



Hochspannungsteiler Lab #4

227-0117-10L: MESS- & VERSUCHSTECHNIK

Präsentiert von:



Begleitet von:

Prof. Dr. Christian M. Franck

Henning Janssen, Philipp Simka, Ondrej Sefl



5. Mai 2022

1 Inhalt

1 Inhalt	2
2 Einführung	4
2.1 Versuchsziel	4
2.2 Theorie	4
2.2.1 Idealer Tiefpassfilter	5
2.2.2 Grundaufbau Hochspannungsteiler.....	6
2.2.3 Rein ohmscher Teiler	7
2.2.4 Rein kapazitiver Teiler.....	7
2.2.5 Gedämpft-Kapazitiver Spannungsteiler (Zaengl-Teiler).....	8
2.2.6 Ohmsch-Kapazitiver Spannungsteiler	9
2.3 Versuchsvorbereitung.....	10
2.3.1 Versuchsaufbau.....	10
2.3.2 Verwendete Gerätschaften.....	11
2.3.3 Messplan	14
2.3.4 Rein ohmscher Teiler – hochohmig	14
2.3.5 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ.....	15
2.3.6 Rein ohmscher Teiler – niederohmig - 1.02 kΩ	16
2.3.7 Rein Kapazitiver Teiler.....	17
2.3.8 Gedämpft Kapazitiver Teiler (Zaengl-Teiler)	19
2.4 Messunsicherheiten.....	20
2.4.1 Messunsicherheiten durch Bauteile	20
2.4.2 Messunsicherheiten durch Versuchs- und Messmittel.....	21
3 Messprotokoll am 28.04.2022	24
3.1 Genereller Versuchsaufbau für die Versuchsreihe	24
3.2 Rein ohmscher Teiler – hochohmig	25
3.3 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ.....	26
3.4 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 1.02 kΩ.....	27
3.4.1 Aufgaben 2.4.2B) 1.-3.	27
3.4.2 Aufgabe 2.4.2B) 4. Zwei schwarze Elemente	27
3.4.3 Aufgabe 2.4.2B) 4. Ein schwarzes Element	28
3.5 Rein kapazitiver Teiler.....	28
3.6 Gedämpft kapazitiver Teiler (Zaengl – Teiler).....	28
4 Ergebnisblatt.....	29
4.1 Rein ohmscher Teiler – hochohmig	29
4.2 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ.....	31
4.3 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 1.02 kΩ.....	33
4.4 Rein kapazitiver Teiler.....	36
4.5 Gedämpft kapazitiver Teiler (Zaengl Teiler).....	38
5 Diskussion	39
5.1 Rein ohmscher Teiler – hochohmig	39
5.2 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ.....	39
5.3 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 1,02 kΩ.....	39

5.4	Rein kapazitiver Teiler.....	40
5.5	Gedämpft kapazitiver Teiler (Zaengl Teiler).....	40
6	Eigenständigkeitserklärung.....	41

2 Einführung

2.1 Versuchsziel

In diesem Versuch sollen die frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften von verschiedenen Spannungsteilerschaltungen mit Hilfe eines modularen Modell-Spannungsteiler ermittelt werden. Da bei der Konstruktion und Dimensionierung auf eine Amplitudenunabhängigkeit geachtet wird (werden muss), können die frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften mit einfachen Sprungantwortmessungen "gemessen", berechnet und (z.B. mit Simulationsresultaten oder unter den verschiedenen Teilern selbst) verglichen werden.

2.2 Theorie

Mit einem handelsüblichen Digital Oszilloskop (DSO) kann man Spannungen mit einer Amplitude von mehreren 10V und fast beliebigen zeitlichen Verlauf messen. Mit sogenannten "Tastköpfen" oder "Voltage Probes", die in einem gewissen Tastverhältnis abtasten, kann der DSO-Messbereich auf mehrere Kilovolt (kV) erweitert werden.

Bei Spannungen im hohen kV- oder Megavolt (MV)-Bereich werden sogenannte Hochspannungsteiler (HS-Teiler) eingesetzt. Dabei wird die Spannung, idealerweise linear, auf ein von einem DSO messbaren Signal mit Amplitude zwischen 10V und 1'000V reduziert.

Weltweit gibt es nur wenige Firmen die fähig sind, geeignete HS-Teiler für DC-, AC- und Impulsspannungen herzustellen. Bandbreite und Messgenauigkeit dieser Teiler hängen direkt von der Bauart ab und werden zusätzlich durch physikalisch-theoretische und technologische Randbedingungen begrenzt. Hinzu kommt, dass die im Praktikum behandelten Teiler ausschliesslich aus passiven Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren) bestehen und die räumlichen Abmessungen (im kV Bereich und höher) aus isoliertechnischen Gründen relativ gross werden, u. A. deshalb werden wir nicht mit Hochspannung operieren. In folgendem Versuch wird die Wirkung der entstehenden Streufelder (E- und B-Feld) gut und einfach erkennbar.

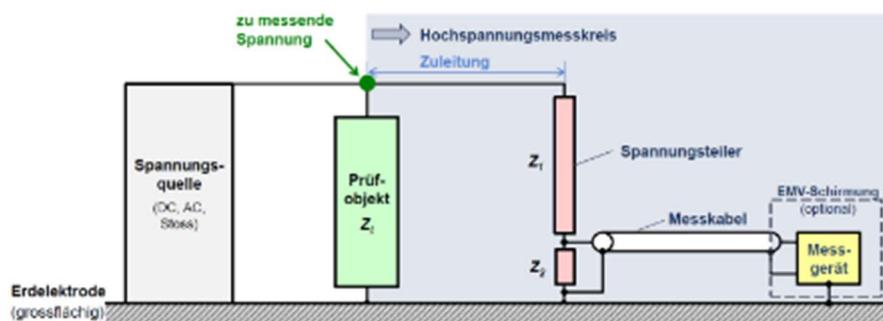


Abbildung 1: Grundaufbau eines Messkreis mit HS-Teiler

Wie in Abb. 1 zu sehen ist, bilden $Z_1(\text{HS})$ und $Z_2(\text{NS})$ in Serie geschalten den Spannungsteiler.

Die in Z1 vorhandenen parasitären Erdstreckenkapazitäten führen zu berechenbaren Nicht-Idealitäten und können als Parallelschaltung von Kapazitäten angenähert werden: $C_e = n \cdot C'_e = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot l}{\ln(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{3} \cdot d})}$

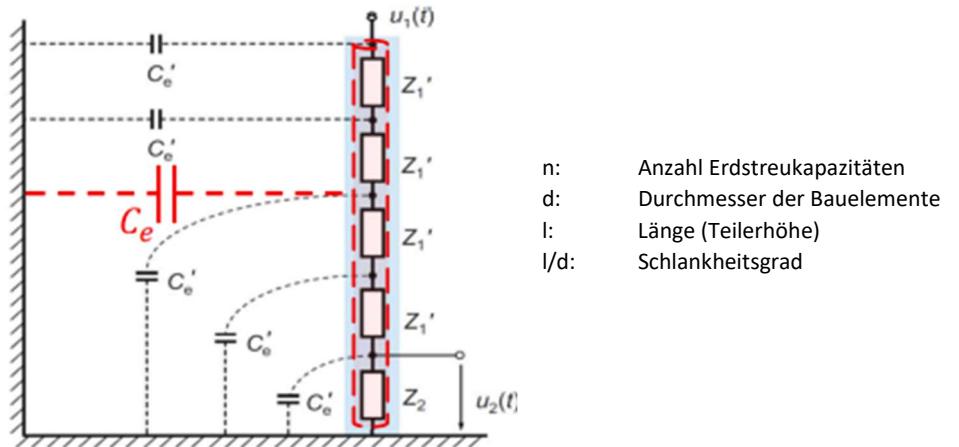


Abbildung 2: Kettenleiterersatzschaltbild mit Erdstreckenkapazitäten

2.2.1 Idealer Tiefpassfilter

Um die Eigenschaften des HS-Teilers zu untersuchen, betrachten wir zuerst den idealen Tiefpassfilter und dessen Sprungantwort:

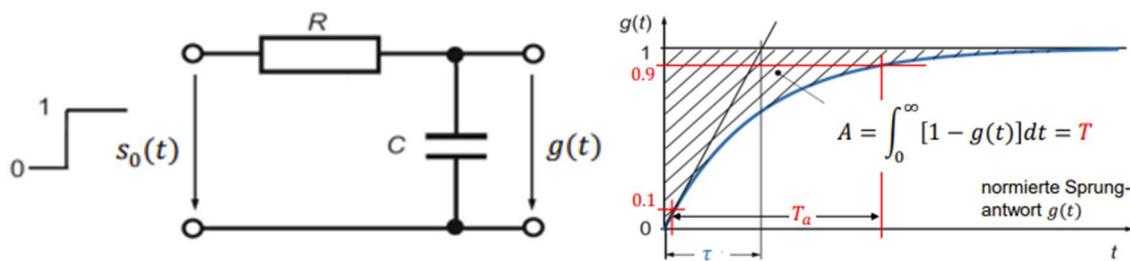


Abbildung 3: Idealer Tiefpassfilter und normierte Sprungantwort

Die **Sprungantwort g(t)** ist gegeben durch: $g(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$. Die Sprungantwort wird normiert definiert. Weitere für den Teiler interessante Parameter sind:

- **Antwortzeit T:** Ermöglicht das Abschätzen des Scheitelwertfehlers und ist gegeben durch:

$$T = \tau = R \cdot C = A \text{ mit } [T] = \text{s} ; [R] = \text{Ohm} ; [C] = \text{F}$$

$$A = \int_0^\infty [1 - g(t)] dt = T$$

$$g(t) = 0.1 \Rightarrow t_{10\%} = -\tau \cdot \ln(1 - 0.1)$$

$$g(t) = 0.9 \Rightarrow t_{90\%} = -\tau \cdot \ln(1 - 0.9)$$

$$\Rightarrow t_{90\%} - t_{10\%} = T_\alpha$$

- **Anstiegs-/Abfallzeit T_α:** Die Zeit, die das System benötigt, um von 10% auf 90% zu steigen (fallen): $T_\alpha = \tau \cdot \ln\left(\frac{1-0.1}{1-0.9}\right) \approx 2.2 \cdot \tau \text{ mit } [T_\alpha] = \text{s}$

- **Grenzfrequenz f_{g0} :** Die Frequenz, bei der die Signalamplitude unter 3dB sinkt
$$f_{g0} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx \frac{2.2}{2\pi T_\alpha} \approx \frac{0.35}{T_\alpha} \text{ mit } [f_{g0}] = \text{MHz}$$
- **Einschwingzeit t_E :** $\left| T = \int_{0_1}^t [1 - g(t)dt] \right| \leq 0.05 \cdot t_E$
- **Überschwingen β :** gibt den grössten Wert an um den die Sprungantwort das Referenzniveau übersteigt.

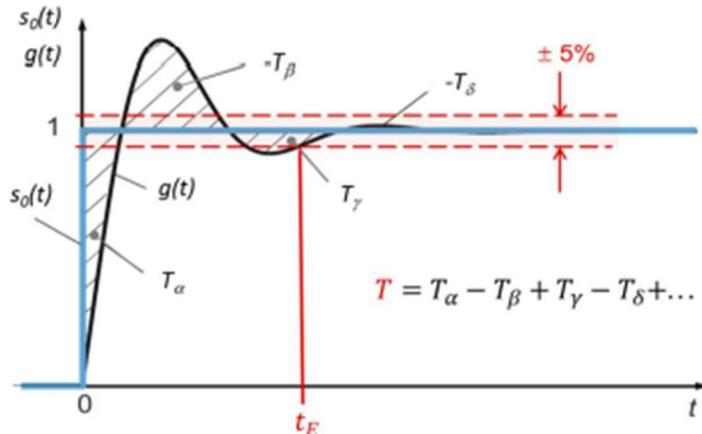


Abbildung 4: Beispiel für eine experimentelle Sprungantwort

2.2.2 Grundaufbau Hochspannungsteiler

In Abb. 5 sind die verschiedenen Grundaufbauten von unterschiedlichen Hochspannungsteilern und die jeweiligen Anwendungsgebiete der Spannungsmesstechnik übersichtlich dargestellt.

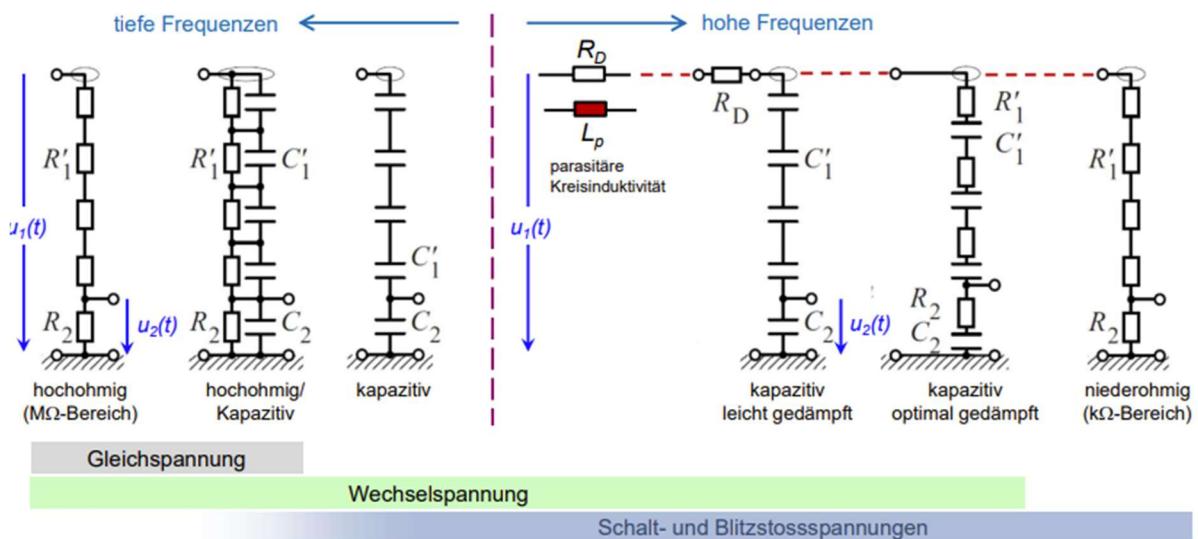


Abbildung 5: Übersicht über verschiedene HS-Teiler und deren Eigenschaften

Massstabfaktor F: Der Massstabfaktor gibt einen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung des Messsystems. Da F frequenzabhängig ist, kann er je nach Spannungsart verschiedene Werte annehmen und für hohe Frequenzen sogar ungültig werden

2.2.3 Rein ohmscher Teiler

Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau eines ohmschen Spannungsteilers mit Dämpfungswiderstand.

2.2.3.1 Hochohmig

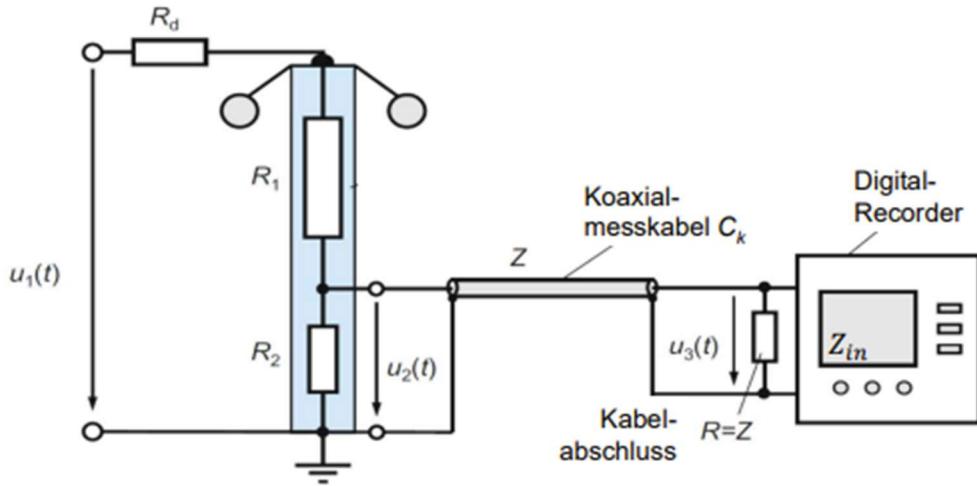


Abbildung 6: Rein ohmscher Spannungsteiler mit Dämpfungswiderstand

Hochohmig Spannungsteiler eignen sich ausschliesslich zur Gleichspannungsmessung, da sich mit den Erdstreckkapazitäten ein RC-Kettenleiter mit markantem Tiefpassverhalten bildet.

- Massstabfaktor F ohne Dämpfungswiderstand: $F_{Hohm} = \frac{u_1}{u_3} \approx \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1+R_2}{R_2}$
- Grenzfrequenz f_{g0} : für hochohmige Teiler dürfen die Parasitären Induktivitäten und Kapazitäten parallel zu den Widerständen vernachlässigt werden: $f_{g0} = \frac{4}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_e} \approx \frac{1.46}{R_1 \cdot C_e}$
- Antwortzeit T: $T = \frac{R_1 \cdot C_e}{6}$

2.2.3.2 Niederohmig

Der niederohmige Spannungsteiler eignet sich aufgrund hoher resultierender Ströme und damit höheren Verlusten weniger für AC- oder DC-Messungen, als in Stoßspannungsmessungen. Um Störungen der Sprungantwort im NS Teil vorzubeugen, wird das Koaxialkabel des Oszilloskops mit einem Widerstand ergänzt.

- Massstabfaktor F mit Dämpfungswiderstand: $F_{Nohm} = \frac{u_1(t)}{u_3(t)} \approx \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1+R_2+R_d}{R_2}$

2.2.4 Rein kapazitiver Teiler

Nur aus Kapazitäten bestehend und deshalb Leistungstechnisch ideal für Wechselstrommessungen

- Massstabfaktor für den idealen kapazitiven Teiler:

$$F_{Kap,id} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = 1 + \frac{C_2}{C_1}$$

- Massstabfaktor für den kapazitiven Teiler mit Kabelkapazität C_K :

$$F_{Kap,K} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} = 1 + \frac{C_2 + C_K}{C_1}$$

- Massstabfaktor für den kapazitiven Teiler mit Kabelkapazität C_K und Streukapazität C_e :

$$F_{Kap,K,e} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = 1 + \frac{C_2 + C_K}{C_1 - \frac{1}{6}C_e}$$

In der letzten Gleichung ist zu sehen, dass der Massstabfaktor frequenzunabhängig ist, wird aber von der Streukapazität C_e beeinflusst!

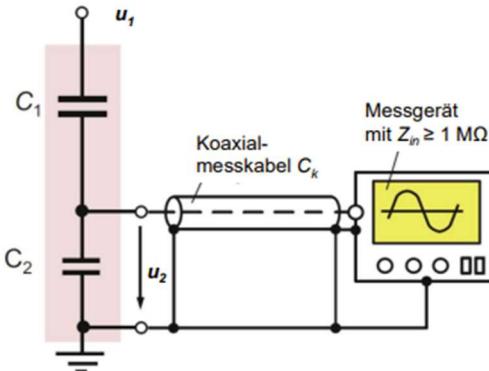


Abbildung 7: Rein-Kapazitiver Spannungsteiler für AC Messungen

2.2.5 Gedämpft-Kapazitiver Spannungsteiler (Zaengl-Teiler)

Der gedämpft-kapazitive Spannungsteiler, auch Zaengl-Teiler genannt, verfügt über in Serie geschaltete Kondensatoren und Widerstände. Letztere sollen Resonanzerscheinungen unterdrücken, die bei einem rein kapazitiven Teiler auftreten würden. Somit werden die positiven Eigenschaften beider vorher behandelten Teiler übernommen.

- Antwortzeit T_Z : $T_Z = \frac{R_1 \cdot C_e}{6}$
- Massstabfaktor F_Z : $F_Z = \frac{R_1 + R_2 + R_d}{R_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} = \frac{L_1 + L_2}{L_2}$

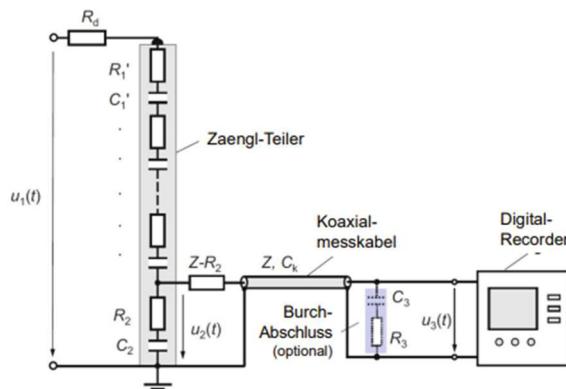


Abbildung 8: Gedämpft-Kapazitiver Spannungsteiler mit optionalem Burch-Abschluss

2.2.6 Ohmsch-Kapazitiver Spannungsteiler

Der ohmsch-kapazitive Spannungsteiler, besteht aus Kondensatoren und Widerständen, die paarweise parallel geschalten sind. Aufgrund des breiten Anwendungsbereiches (AC, DC und Stoßspannung) werden diese auch Universalteiler genannt.

- Massstabfaktor $F_{\text{Ohm-K}}$: $F_{\text{Ohm-K}} = \frac{R_1 + R_2 + R_d}{R_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1}$

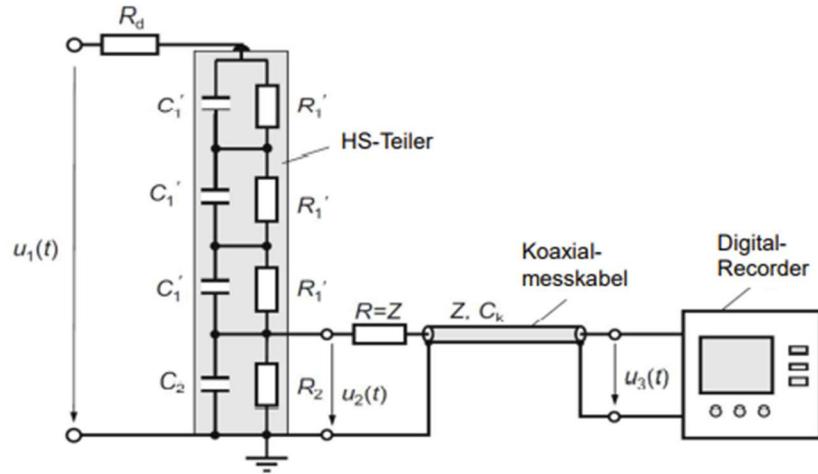


Abbildung 9: Ohmsch-Kapazitiver Spannungsteiler

2.3 Versuchsvorbereitung

2.3.1 Versuchsaufbau

Wie in der Versuchsanleitung erklärt, eignet sich für die Messung der Sprungantwort in unserem Fall die folgend schematisch gezeigte Messanordnung.

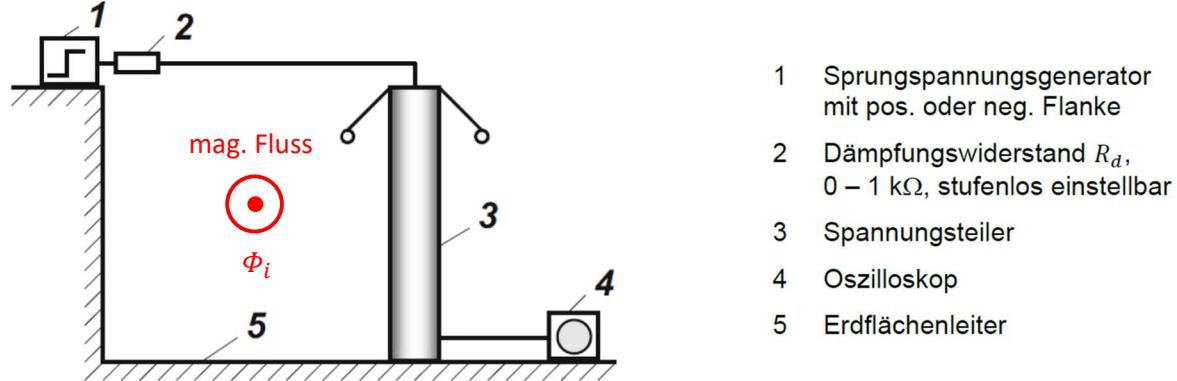


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Messanordnung

Dabei verwenden wir für die Erhöhung des Sprungspannungsgenerators ein Labor-Stativ, welches idealerweise auf dieselbe Höhe eingestellt wird, wie der Steckplatz des Zuleitungskabels am Spannungsteiler, wobei das 75 cm lange Kabel straff gespannt ist. Der am Teilerfuß befestigte und zum Sprungspannungsgenerator zurückgeführte Erdflächenleiter realisieren wir mittels einem 50 mm breiten Kupferflachband. Ziel ist es, dass Verhältnis von Höhe und Breite der Anordnung so anzupassen, dass die durch den Spannungsteiler, das Zuleitungskabel und des Erdflächenleiters eingeschlossene Fläche ein Rechteck bildet (symmetrische Ausrichtung).

Das entsprechende Blockschaltbild sieht dann wie folgt aus:

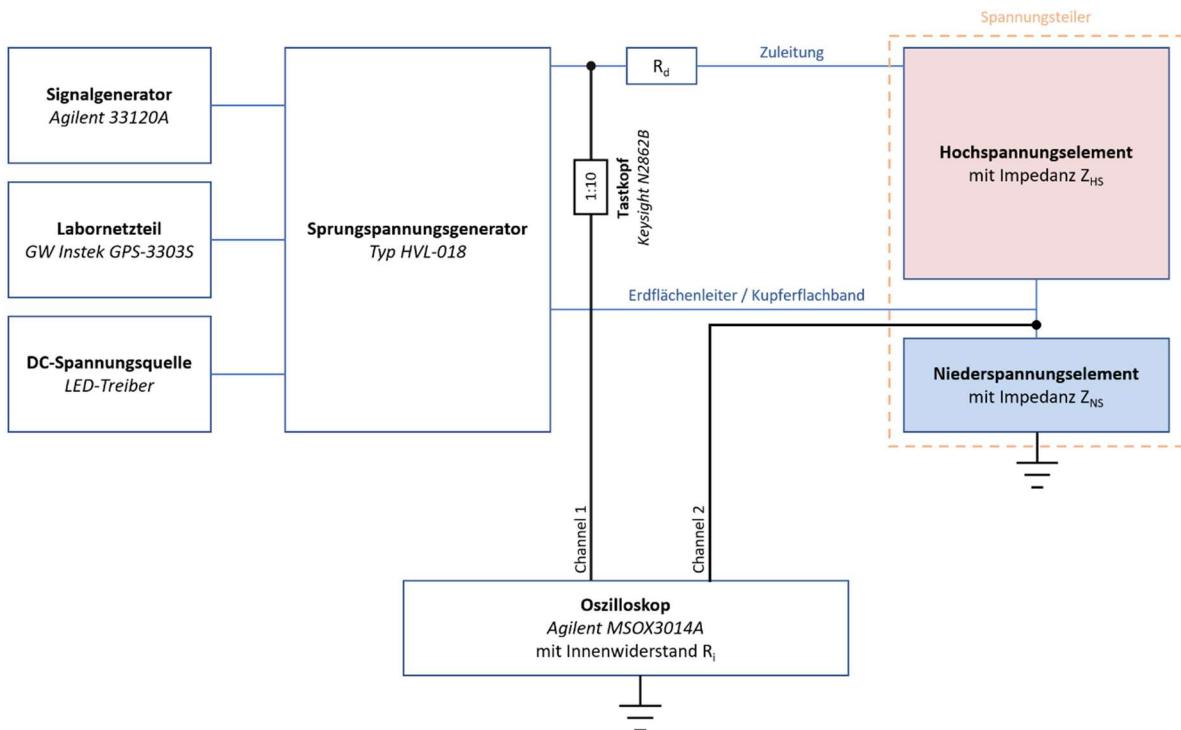


Abbildung 11: Blockschaltbild der Messanordnung

Einführung

Dabei variieren wir je nach Versuch sowohl das Hoch- als auch das Niederspannungselement. Die nächste Tabelle gibt eine Übersicht der verschiedenen Konfigurationen über die 5 Versuche.

Aufgabe in Versuchsanleitung	Beschreibung	Impedanz Z_{HS} des Hochspannungselements	Impedanz Z_{NS} des Niederspannungselements
2.4.1.	Rein ohmscher Teiler (hochohmig)	765 MΩ (15 x 51 MΩ in Serie)	Leerlauf 1 MΩ (Eingang DSO)
2.4.2.A.	Rein ohmscher Teiler (niederohmig)	16.5 kΩ (15 x 1'100 Ω in Serie)	36 Ω (12 x 432 Ω parallel)
2.4.2.B.	Rein ohmscher Teiler (niederohmig)	1.02 kΩ (15 x 68 Ω in Serie)	2.23 Ω (12 x 26.7 Ω parallel) 2.15 Ω (2 x 4.3 Ω parallel) 2.15 Ω (1 x einzeln)
2.4.3.	Rein kapazitiver Teiler	313 pF (15 x 4.7 nF in Serie)	144 nF (12 x 12 nF parallel) 150 nF (2 x 75 nF Ω parallel) 150 nF (1 x einzeln)
2.4.4.	Gedämpft kapazitiver Teiler Zaengl-Teiler	313 pF (15 x 4.7 nF in Serie) 1.02 kΩ (15 x 68 Ω in Serie)	144 nF (12 x 12 nF parallel) 2.23 Ω (12 x 26.7 Ω parallel)

Tabelle 1: Konfigurationsübersicht über die Messversuche

2.3.2 Verwendete Gerätschaften

Die folgend aufgelisteten Geräte bleiben in ihren Konfigurationen, abgesehen vom Oszilloskop, durch alle Versuchsmessungen konstant.

Signalgenerator – Agilent 33120A

Zur Ansteuerung des MOSFET-Schalters mittels +5 V TTL-Signal.

- Duty cycle: 50%
- Offset: +2.5 ... 2.7 V
- Wellenform: Rechteck
- Output: High Z Termination
- Amplitude: 5 V_{pp}
- Verbundtyp zum SSG: Koaxialkabel

Labornetzteil – GW Insteek GPS-3303S

Liefert die geforderte DC-Eingangsspannung, wobei das Netzteil eine Amplitude von +18 V_{DC} nicht überschreiten darf.

- V_{DC,max} = 18 V
- Verbundtyp zum SSG: Laborkabel

DC-Spannungsquelle – LED-Treiber

Als DC-Spannungsquelle verwenden wir bei diesen Versuchen einen kommerziellen LED-Treiber.

- V_{out} = 220 V
- P = 75 W

Sprungspannungsgenerator (SSG) – Typ HVL-018

- Eingänge
 - Signalgenerator: TTL-Signal
 - Labornetzteil: $+18 \text{ V}_{\text{DC}}$
 - DC-Spannungsquelle: $V_{\text{out}} = 220 \text{ V}$
- Ausgang:
 - Angeschlossen an Teiler-Zuleitung mit dazwischen gestecktem, variablem Dämpfungswiderstand.
 - Wird durch einen Tastkopf, angeschlossen an das Oszilloskop, abgegriffen.

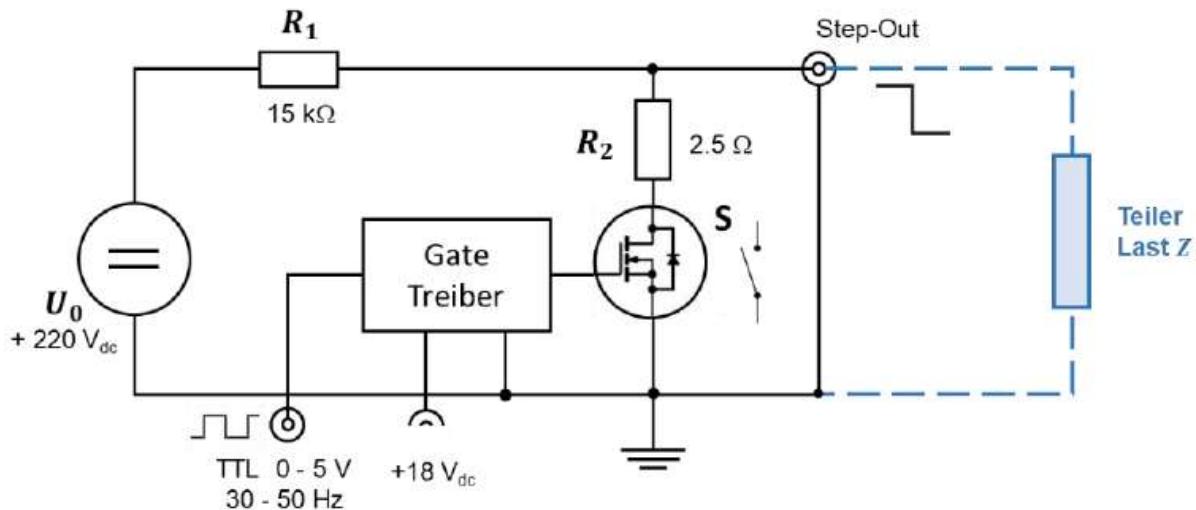


Abbildung 12: Sprungspannungsgenerator (SSG) – Typ HVL-018

Spannungsteiler

Der sich im Blockschaltbild rechts befindliche Spannungsteiler besteht aus zwei Teilen. Dem obigen Hochspannungselement Z_{HS} und dem darunter angebrachten Niederspannungselement Z_{NS} .

- Hochspannungselement
 - Realisierungsform: Steckbrett mit Knotenpunkten aus Messing.
 - Höhe: 0.9 m
 - Anzahl Knotenpunkte: 32
 - Aussendurchmesser: 32 mm
 - Netzstruktur: variabel, Widerstände und Kondensatoren anschliessbar.
 - Eingang: Teiler-Zuleitung
 - Ausgang: an Niederspannungselement angeschlossen
- Niederspannungselement
 - Realisierungsform: koaxialer Fuss
 - Anzahl Steckpfade: 12 (parallel)
 - Eingang: Steckbrett des Hochspannungselements
 - Ausgang: zentrale Abgriffstelle unter dem Fuss; Rückführung des Erdflächenleiters zum SSG mittels Kupferflachband.

Einführung

Oszilloskop – Agilent MSOX3014X

Für sämtliche in diesem Versuch zu erbringende Messungen wird dieses Oszilloskop verwendet. Verbunden mit dem unten aufgeführten Tastkopf messen wir einerseits den Ausgang am Sprungspannungsgenerator mit einem Verhältnis von 1:10 und die Spannung am Niederspannungselement mit einem Verhältnis 1:1.

Tastköpfe – Passiv Keysight N2862B

- 150 MHz
- 300 V

2.3.3 Messplan

Die Sprungspannung und die Sprungantwort am Niederspannungsteil werden mit dem Oszilloskop gemessen. Gemäss Kapitel 3.3.2 der Versuchsanleitung kann nur die Abfallzeit T_a und die Amplitude automatisch gemessen werden. Die Antwortzeit T , die Einschwingzeit t_E und die Überschwingung β müssen manuell bestimmt beziehungsweise abgeschätzt werden. Dabei kann die Antwortzeit T grafisch aus der Sprungantwort abgelesen werden. Im Folgenden ist ein Beispiel der Berechnung der Antwortzeit T eines hochohmigen Versuchsaufbaus.

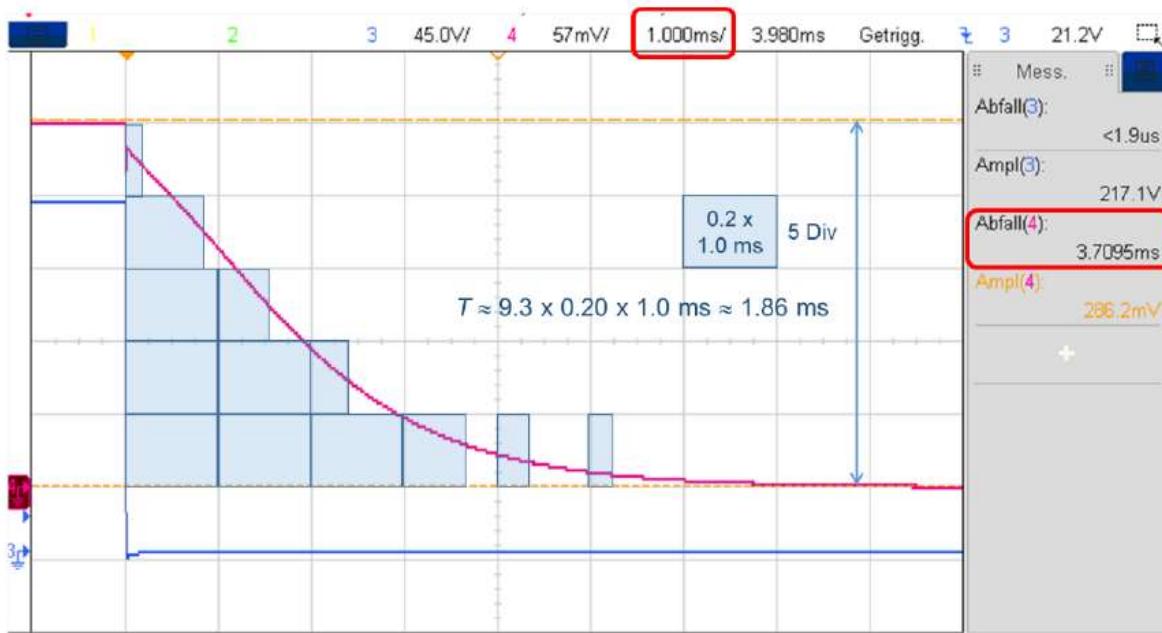


Abbildung 13: Beispiel zur Berechnung von der Antwortzeit T

2.3.4 Rein ohmscher Teiler – hochohmig

Verschiedene Parameter sollen gemessen und mit den gerechneten Werten verglichen werden. In weiteren Schritten soll die Auswirkung des variablen Dämpfungswiderstands R_d sowie das Weglassen des 47.5Ω Serieabschluss für das Koaxialmesskabel am Teiler und externe Einflüsse untersucht werden.

Hochspannungsteil	765 MΩ	(15 x 51 MΩ in Serie)
Niederspannungsteil	1 MΩ	(Eingang DSO)

Abbildung 14: Konfiguration dieses Teilversuches

Massstabfaktor F :

$$F = \frac{R_1 + R_2 + R_{abs} + R_d}{R_2 + R_{abs}}$$

Erdkapazität C_e :

$$C_e = \frac{2 \cdot \pi i \cdot e_0 \cdot l}{\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{3} \cdot d} \right)}$$

Daraus ergibt sich für $R_d = 0 \Omega$ ein Massstabsfaktor von $F = 765.963$ und für $R_d = 1 \text{ k}\Omega$ ein Massstabsfaktor von $F = 765.964$. Die Erdkapazität beläuft sich auf $C_e = 21.377 \text{ pF}$ (mit $l = 0.9 \text{ m}$ und $d = 0.1 \text{ m}$).

Messplan:

1. Oszilloskop: DC-Coupling, High-Impedance, $N = 200$
2. Abfallzeit T_a , Amplitude, die Einschwingzeit t_E , Überschwingung β , Massstabfaktor und Antwortzeit T bestimmen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. Manuelle Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
 - d. Grafische Bestimmung der Antwortzeit T
3. R_d und R_{abs} verändern und Messungen wiederholen, auch μs -Zeitbereich betrachten aber ohne Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
4. Sprungantwort betrachten unter veränderlicher Erdkapazität C_e

2.3.5 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ

Verschiedene Parameter sollen gemessen werden und mit den gerechneten Werten verglichen werden. In weiteren Schritten soll die Auswirkung des variablen Dämpfungswiderstands R_d sowie das Weglassen des 47.5Ω Serieabschluss für das Koaxialmesskabel am Teiler und externe Einflüsse untersucht werden.

Hochspannungsteil	16.5 kΩ	(15 x 1'100 Ω in Serie)
Niederspannungsteil	36 Ω	(12 x 432 Ω parallel)

Abbildung 15: Konfiguration dieses Teilversuches

Mit der Verwendung der bereits gezeigten Formel für den Massstabfaktor ergibt für $R_d = 0 \Omega$ und $R_{osz} = 1 \text{ M}\Omega$ ein Massstabsfaktor von $F = 459.35$ und für $R_d = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_{osz} = 1 \text{ M}\Omega$ ein Faktor von $F = 487.129$. Für $R_d = 0 \Omega$ und $R_{osz} = 50 \Omega$ ein Massstabsfaktor von $F = 628.564$ und für $R_d = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_{osz} = 50 \Omega$ ein Faktor von $F = 666.598$.

Messplan:

1. Oszilloskop: DC-Coupling, High-Impedance, $N = 200$
2. Abfallzeit T_a , Amplitude, die Einschwingzeit t_E , Überschwingung β , Massstabfaktor und Antwortzeit T bestimmen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. Manuelle Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
 - d. Grafische Bestimmung der Antwortzeit T
3. R_d und R_{abs} verändern und Messungen wiederholen, auch μ s-Zeitbereich betrachten aber ohne Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
4. Verlauf der Sprungantwort untersuchen, indem die Spannungs- und Abfallwerte gemessen werden, unter veränderlicher Erdkapazität C_e
5. Beobachtung der Sprungantwort bei $R_{osz} = 50 \Omega$ für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Low-Impedance beim Oszilloskop
 - b. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - c. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung

2.3.6 Rein ohmscher Teiler – niederohmig - $1.02 \text{ k}\Omega$

Verschiedene Parameter sollen gemessen werden und mit den gerechneten Werten verglichen werden. In weiteren Schritten soll die Auswirkung des variablen Dämpfungswiderstands R_d sowie das Weglassen des 47.5Ω Serieabschluss für das Koaxialmesskabel am Teiler und externe Einflüsse untersucht werden.

Hochspannungsteil	$1.02 \text{ k}\Omega$	($15 \times 68 \Omega$ in Serie)
Niederspannungsteil	2.23Ω	($12 \times 26.7 \Omega$ parallel)
	2.15Ω	($2 \times 4.3 \Omega$ parallel)
	2.15Ω	(1 x einzeln)

Abbildung 16: Konfiguration dieses Teilversuches

Mit der Verwendung der bereits gezeigten Formel für den Massstabfaktor ergibt für $R_d = 0 \Omega$ und $R_{osz} = 1 \text{ M}\Omega$ ein Massstabsfaktor von $F = 458.4$ und für $R_d = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_{osz} = 1 \text{ M}\Omega$ ein Faktor von $F = 906.832$. Für $R_d = 0 \Omega$ und $R_{osz} = 50 \Omega$ ein Massstabsfaktor von $F = 468.861$ und für $R_d = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_{osz} = 50 \Omega$ ein Faktor von $F = 927.548$

Messplan:

1. Oszilloskop: DC-Coupling, High-Impedance, $N = 200$
2. Abfallzeit T_a , Amplitude, die Einschwingzeit t_E , Überschwingung β , Massstabfaktor und Antwortzeit T bestimmen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. Manuelle Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
 - d. Grafische Bestimmung der Antwortzeit T
3. R_d und R_{abs} verändern und Messungen wiederholen, auch μ s-Zeitbereich betrachten aber ohne Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
4. Verlauf der Sprungantwort untersuchen, indem die Spannungs- und Abfallwerte gemessen werden, unter veränderlicher Erdkapazität C_e
5. Beobachtung der Sprungantwort bei $R_{osz} = 50 \Omega$ für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Low-Impedance beim Oszilloskop
 - b. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - c. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
6. Niederspannungsteil anpassen und Messungen wiederholen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Zwei Messungen mit veränderten Widerständen
 - b. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - c. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung

2.3.7 Rein Kapazitiver Teiler

Verschiedene Parameter sollen gemessen werden unter anderem das Teilverhältnis, die Abfallzeit T_a , die Antwortzeit T sowie die Einschwingzeit t_E . Weiter soll die Auswirkung des variablen

Hochspannungsteil	313 pF (15 x 4.7 nF in Serie)
Niederspannungsteil	144 nF (12 x 12 nF parallel)
	150 nF (2 x 75 nF Ω parallel)
	150 nF (1 x einzeln)

Abbildung 17: Konfiguration dieses Teilversuches

Einführung

Dämpfungswiderstands R_d sowie das Weglassen des 47.5Ω Serieabschluss für das Koaxialmesskabel am Teiler untersucht werden. Versuchshalber soll ebenso die Bandbreitenbegrenzung eingeschalten werden und der Kurvenverlauf soll optimiert werden.

Messplan:

1. Oszilloskop: DC-Coupling, High-Impedance, $N = 200$
 2. Abfallzeit T_a , Amplitude, die Einschwingzeit t_E , Überschwingung β , Massstabfaktor und Antwortzeit T bestimmen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. Manuelle Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
 - d. Grafische Bestimmung der Antwortzeit T
 3. Untersuchung der Sprungantwort bei optimiertem R_d , indem die unten aufgeführten Schritte vollzogen werden
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. R_{abs} : variieren
 4. Untersuchung der Sprungantwort bei Bandbreitenbegrenzung am Oszilloskop durch folgende Schritte
 - a. Bandbreitenbegrenzung einstellen
 - b. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - c. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - d. Einstellen von R_d und R_{abs} :
 5. Beobachtung der Sprungantwort ohne R_{osz} , indem die oben beschriebenen Schritte von 4. wiederum ausgeführt werden
 6. Niederspannungsteil anpassen und Messungen wiederholen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Zwei Messungen mit veränderten Kondensatoren
 - b. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - c. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
- Niederspannungsteil anpassen und Messungen wiederholen für bestimmtes R_d und R_{abs} :

2.3.8 Gedämpft Kapazitiver Teiler (Zaengl-Teiler)

Verschiedene Parameter sollen gemessen werden unter anderem das Teilverhältnis, die Abfallzeit T_a , die Antwortzeit T sowie die Einschwingzeit t_E . Weiter soll das Weglassen des 47.5Ω Serieabschluss für das Koaxialmesskabel am Teiler untersucht werden. Die Grenzfrequenz wird zudem berechnet.

Hochspannungsteil	313 pF 1.02 kΩ	(15 x 4.7 nF in Serie) (15 x 68 Ω in Serie)
Niederspannungsteil	144 nF 2.23 Ω	(12 x 12 nF parallel) (12 x 26.7 Ω parallel)

Abbildung 18: Konfiguration dieses Teilversuches

Messplan:

1. Oszilloskop: DC-Coupling, High-Impedance, $N = 200$
2. Abfallzeit T_a , Amplitude, die Einschwingzeit t_E , Überschwingung β , Massstabfaktor und Antwortzeit T bestimmen für bestimmtes R_d und R_{abs} :
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. Manuelle Bestimmung der Einschwingzeit t_E sowie der Überschwingung β
 - d. Grafische Bestimmung der Antwortzeit T
3. Beobachtung der Sprungantwort bei optimiertem R_d durch das Ausführen der folgenden Schritte
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung
 - c. R_{abs} : variieren
4. Beobachtung der Sprungantwort ohne R_{osz} für bestimmtes R_d , indem folgende Messungen vollzogen werden
 - a. Messung der Ausgangsspannung am Sprungspannungsgenerator $u_1(t)$ und der Niederspannung $u_2(t)$
 - b. Ablesen der Abfallzeit T_a und der Amplitude der automatischen Auswertung

2.4 Messunsicherheiten

Für alle Teilversuche gelten die Messunsicherheiten der Widerstände, am Ausgang Sprungspannungsgenerator, Niederspannung und die Messunsicherheit am Oszilloskop.

2.4.1 Messunsicherheiten durch Bauteile

Die verwendeten Bauteile für die Versuchsreihe sind nicht ideal, weshalb die exakten Werte etwas von den angegebenen abweichen. Diese Bauteiltoleranzen sind in der Versuchsanleitung unter Kapitel 5 gegeben, und werden hier zweckmässig wiederholt. Dabei unterteilen wir den Spannungsteiler wieder in sein Hochspannungselement und Niederspannungselement auf.

Versuch	Rein ohmscher Teiler					Rein kapazitiver Teiler	Zaengl-Teiler
Beschreibung	hochohmig		niederohmig			kapazitiv	ohmsch-kapazitiv
Steckart Niederspannungselement	keine Steckkomponenten	12 Widerstände parallel	12 Widerstände parallel	2 schwarze Widerstände parallel	1 schwarzer Widerstand	12 parallele Kapazitäten in Serien mit 12 parallelen Widerständen	2.23 $\Omega \pm 0.112 \Omega$
Gesamtwiderstand Niederspannungselement	$1 M\Omega \pm 0.01 M\Omega$ (Eingang DSO)	$36 \Omega \pm 1.8 \Omega$	$2.23 \Omega \pm 0.112 \Omega$	$2.15 \Omega \pm 0.108 \Omega$			
Gesamtkapazität Niederspannungselement						$144 nF \pm 14.4 nF$	$144 nF \pm 14.4 nF$
Steckart Hochspannungselement	15 Widerstände in Serie	15 Widerstände in Serie	15 Widerstände in Serie	15 Widerstände in Serie	15 Widerstände in Serie	15 Kapazitäten in Serie	15 Kapazitäten und 15 Widerstände jeweils abwechselnd in Serie
Gesamtwiderstand Hochspannungselement	$765 M\Omega \pm 7.65 M\Omega$	$16.5 k\Omega \pm 0.825 k\Omega$	$1.02 k\Omega \pm 0.051 k\Omega$			313 $pF \pm 15.65 pF$	$1.02 k\Omega \pm 0.051 k\Omega$
Gesamtkapazität Hochspannungselement							

Abbildung 19: Bauteilabweichungen der Messreihen gemäss den einzelnen Bauteiltoleranzen

2.4.1.1 Bauteiltoleranzen des Hochspannungselements

Wie in 2.3.2 beschrieben, befinden sich jeweils 15 Steckelemente in Serie geschaltet auf dem Hochspannungselement. Beim letzten Versuch sind 30 Steckelemente in Serie zusammengeschaltet.

Bauteil	Grösse	Material	Toleranz
Widerstand	68 Ω	Kohle-Masse (1 W)	$\pm 5 \%$
	1.1 $k\Omega$	Kohle-Masse (1 W)	$\pm 5 \%$
	51 $M\Omega$	Dickschicht (0.5 W)	$\pm 1 \%$
Kondensator	4.7 nF	mit Propylenfilm metallisiert	$\pm 5 \%$

Abbildung 20: Bauteiltoleranzen im Hochspannungselement

Mit Fehlererweiterungsfaktor $k=2$

2.4.1.2 Bauteiltoleranzen des Niederspannungselements

Bauteil	Grösse	Material	Toleranz
Widerstand	2.15 Ω	Kohle-Masse (0.5 W)	$\pm 5\%$
	4.3 Ω	Kohle-Masse (0.5 W)	$\pm 5\%$
	26.7 Ω	Kohle-Masse (0.5 W)	$\pm 5\%$
	432 Ω	Kohle-Masse (0.5 W)	$\pm 5\%$
	1 M Ω	Eingang DSO	$\pm 1\%$
Kondensator	4.7 nF	mit Propylenfilm metallisiert	$\pm 10\%$

Abbildung 21: Bauteiltoleranzen im Niederspannungselement

Mit Fehlererweiterungsfaktor k=2

2.4.2 Messunsicherheiten durch Versuchs- und Messmittel

Signalgenerator – Agilent 33120A

Für unsere Versuche beträgt die Messungenauigkeit des Signalgenerators $\pm 1\%$.

Labornetzteil – GW Instek GPS-3303S

Das Datenblatt des Labornetzteils liefert uns für den Channel 1 bei einer Gleichspannung von ca. 18 Volt eine Unsicherheit von maximal $0.01\% + 3\text{mV}$. Dies bedeutet, dass die maximale Messunsicherheit $\pm 4.8 \text{ mV}$ beträgt und somit $V_{out,Labornetzteil} = 18 \text{ V} \pm 4.8 \text{ mV}$ beträgt. Im Vergleich zum SSG ist jedoch diese Unsicherheit auch zu vernachlässigen und wird als konstant angenommen.

DC-Spannungsquelle – LED-Treiber

In der Versuchsanleitung wurden nur Angaben zum Ripple gemacht. Weitere Unsicherheiten der DC-Spannungsquelle nicht angegeben wurden, nehmen wir dieses Gerät ideal an.

Sprungspannungsgenerator (SSG) – Typ HVL-018

Die Sprungspannung des SSG wird mit dem Tastkopf in Kombination mit dem Oszilloskop am Ausgang ausgemessen. Wir erhalten eine gesamte Messunsicherheit von $\pm 3\%$ mit einem Erweiterungsfaktor von k=2.

Oszilloskop – Agilent MSOX3014X

Die Genauigkeit des Oszilloskops beträgt $\pm 2\%$ des Messbereichs und es wird jeweils nur das gemessen, was im Display zu sehen ist.

Wie in der Vorlesung gezeigt, müssen wir alle Beiträge zur Bestimmung der Messunsicherheit bei Spannungsmessungen mit dem Oszilloskops bestimmen.

Die **Quantisierungsungenauigkeit** Δu_q bei einem 8-bit Oszilloskop ($n=8$) berechnet sich zu

$$\Delta u_q = \frac{\text{Messbereich}}{2\sqrt{3} \cdot N} = \frac{\#div_i \cdot \frac{\text{Spannung}}{\text{Division}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 2^8}$$

wobei

$$\text{Messbereich} = \#div_i \cdot \frac{\text{Spannung}}{\text{Division}}, \quad N = 2^n = 2^8 \text{ und } k=2$$

$\#div_i :=$ Anzahl vertikale Divisionen im Messbereich

Die **vertikale Ungenauigkeit** beträgt im «Worst Case»

$$\Delta u_{VG} = 2 \% \cdot \text{Messbereich} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Der in Kombination verwendete **Tastkopf** verursacht folgende Messungenauigkeit

$$\Delta u_{TK} = 0.03 \cdot \frac{1}{2} \cdot \text{Messwert} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Dazu die mit der Oszilloskop-Statistikauswertung **empirisch ermittelte Standardabweichung s**

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Damit kann die **kombinierte Standardunsicherheit** der Spannungsmessung mit dem Oszilloskop berechnet werden:

$$\Delta u_c = \sqrt{s^2 + \Delta u_q^2 + \Delta u_{VG}^2 + \Delta u_{TK}^2}, \text{ Auftrittswahrscheinlichkeit von } 63.27 \%$$

Und schlussendlich kann die **erweiterte Messunsicherheit** mit $k=2$ bestimmt werden:

Vergleicht man die Quantisierungsunsicherheit des Oszilloskops mit der Kombinierten Messunsicherheit des SSGs ($\pm 3 \%$, $k=2$), stellt man fest, dass diese wesentlich kleiner ist.

Tastköpfe – Passiv Keysight N2862B

Der Tastkopf weist eine Messunsicherheit von $\pm 3 \%$ und einen Erweiterungsfaktor von $k=2$ auf und wird so zusammen mit dem Oszilloskop verwendet.

Bestimmung der Antwort-, Anstiegs-, Abfall- und Einschwingzeit

Zur Bestimmung der oben genannten Zeiten verwenden wir neben der Measure-Funktion des Oszilloskops auch eine graphische Methode, wie sie unter 3.3.2 in der Versuchsanleitung beschrieben ist. Diese Graphische Methode ist fehlerbehaftet, wobei der Messfehler zwischen den einzelnen Messungen je nach Oszillation der Kurve und Konfiguration des Oszilloskops zwischen 2 % und 10 % variiert.

3 Messprotokoll am 28.04.2022

3.1 Genereller Versuchsaufbau für die Versuchsreihe

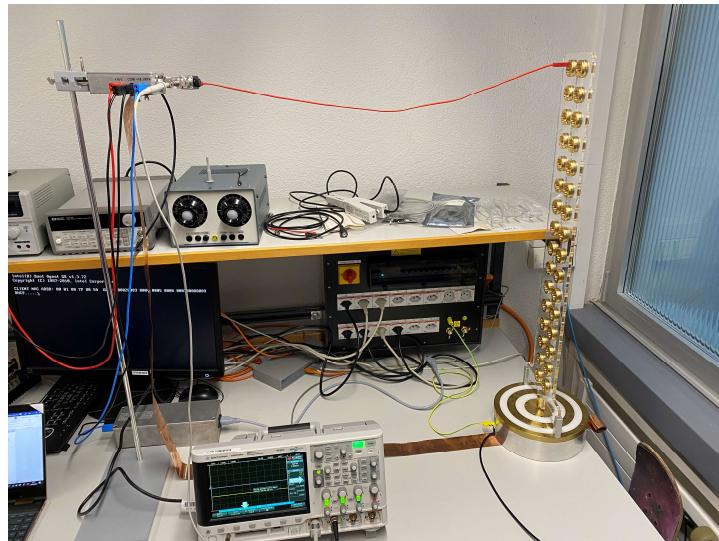


Abbildung 22: Physikalische Versuchsanordnung wie in der Versuchsvorbereitung beschrieben

Der Versuch wurde wie in der Vorbereitung unter Punkt “2.3.1 Versuchsaufbau” aufgestellt.

Alle Geräte haben wir dann gemäss den in der Versuchseinführung beschriebenen Einstellungen eingestellt und in Betrieb genommen. Für den Agilent Funktionsgenerator haben wir aber eine Frequenz von 30 Hz verwendet.

Aufgabe	scope	BildNr.	Z_HS	Z_NS	R_D	Serienwiderstand	CH1_Impedanz	Beschreibung	Kommentar
2.4.1.	0	15	15x51 MΩ	1 MΩ	min	ja	high	weit	
2.4.1.	1	-	15x51 MΩ	1 MΩ	min	ja	high	nahe	
2.4.1.	2	19	15x51 MΩ	1 MΩ	max	ja	high	weit	
2.4.1.	3	21	15x51 MΩ	1 MΩ	min	ja	high	SPA	
2.4.1.	4	26,27	15x51 MΩ	1 MΩ	min	nein	high	SPA	
2.4.1.	5	28,29	15x51 MΩ	1 MΩ	min	nein	high	nahe	
2.4.1.	6	30	15x51 MΩ	1 MΩ	max	nein	high	nahe	
2.4.1.	7	31,32	15x51 MΩ	1 MΩ	max	nein	high	SPA	
-	8	34,35	15x100 kΩ	12x432 Ω	nein	high			kurzschluss bei NS-Fuss
2.4.2.A	9	36,37	15x100 kΩ	12x432 Ω	min	nein	high	SPA	
2.4.2.A	10	38,39	15x100 kΩ	12x432 Ω	min	nein	low	SPA	
2.4.2.A	11	40,41	15x100 kΩ	12x432 Ω	max	nein	high	SPA	
2.4.2.A	12	42,43	15x100 kΩ	12x432 Ω	max	nein	low	SPA	
2.4.2.A	13	44,45	15x100 kΩ	12x432 Ω	min	ja	high	SPA	
2.4.2.A	14	46,47	15x100 kΩ	12x432 Ω	min	ja	low	SPA	
2.4.2.A	15	48,49	15x100 kΩ	12x432 Ω	max	ja	high	SPA	
2.4.2.A	16	50,51	15x100 kΩ	12x432 Ω	max	ja	low	SPA	
2.4.2.B	17	52,53	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	min	ja	high	SPA	
2.4.2.B	18	54,55	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	min	ja	low	SPA	
2.4.2.B	19	56,57	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	max	ja	high	SPA	
2.4.2.B	20	58,59	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	max	ja	low	SPA	
2.4.2.B	-	60,61	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	min	nein	high	SPA	
2.4.2.B	22	62,63	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	min	nein	low	SPA	
2.4.2.B	23	65,66	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	max	nein	high	SPA	
2.4.2.B	24	67,68	15x68 Ω	12 x 26.7 Ω	max	nein	high	SPA	zoomed out
2.4.2.B	25	69,70	15x68 Ω	13 x 26.7 Ω	max	nein	low	SPA	
2.4.2.B.4.i	26	78,79	15x68 Ω	2x 4.3 Ω (schwarz)	min	nein	high	SPA	
2.4.2.B.4.i	27	80,81	15x68 Ω	2x 4.3 Ω (schwarz)	max	nein	high	SPA	
2.4.2.B.4.ii	28	82,83	15x68 Ω	1x2.15 Ω (schwarz)	min	nein	high	SPA	
2.4.2.B.4.ii	29	84,85	15x68 Ω	1x2.15 Ω (schwarz)	max	nein	high	SPA	
2.4.3.	30	88,89,90	15x4.7 nF	12x12 nF	min	ja	high	SPA	zoomed out
2.4.3.	31	91,92	15x4.7 nF	12x12 nF	min	ja	high	SPA	
2.4.3.	32	93,94	15x4.7 nF	12x12 nF	max	ja	high	SPA	
2.4.3.	33	95,96	15x4.7 nF	12x12 nF	min	ja	high	SPA	mit bandbegrenzung
2.4.3.	34	97,98	15x4.7 nF	12x12 nF	max	ja	high	SPA	mit bandbegrenzung
2.4.4.	35	100,101	15x68 Ω & 15x4.7 nF (seriell)	12x12 nf & 12x26.7 Ω (parallel)	min	ja	high	SPA	ohne bandbegrenzung
2.4.4.	36	102,103	15x68 Ω & 15x4.7 nF (seriell)	12x12 nf & 12x26.7 Ω (parallel)	max	ja	high	SPA	ohne bandbegrenzung
-	37	104,(105)							SPA

Tabelle 2: Übersicht der Dateizugehörigkeiten des Oszillators und der Handyfotos mit den Messungen

3.2 Rein ohmscher Teiler – hochohmig

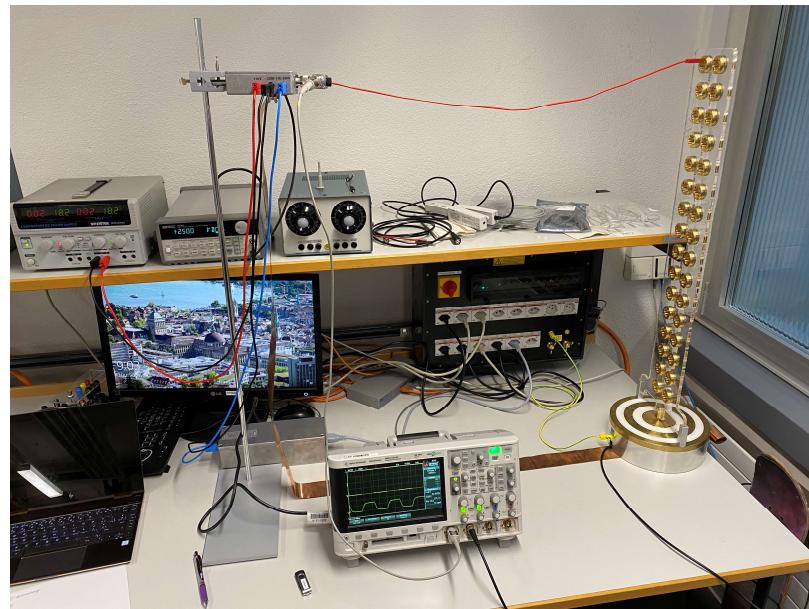


Abbildung 23: Versuchsaufbau mit hochohmigem Teiler

Rein ohmscher Teiler - hochohmig								
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ms	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV
0	0		50	50	1		217.10	0.00
0	47.5		50	50	10		217.10	0.00
1000	0		50	50	1		217.10	0.00
1000	47.5		50	50	10		217.10	0.00
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ms	std. T in ms	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ms	Einschwingzeit t_e in ms		
0	0	3.7	69.6	755.68	1.89	3.9		Scope 4
0	47.5	3.86	42.08	755.39	1.7	5		Scope 3
1000	0	3.72	73.10	756.71	1.80	3.85		Scope 7
1000	47.5	3.89	32.37	755.39	2	5		Scope 2

Tabelle 3: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

3.3 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ



Abbildung 24: Versuchsaufbau Niederohmiger Teiler mit weniger Ersatzwiderständen

Weniger Ersatzwiderstände sind weniger ideal, da die parasitären Induktivitäten dadurch grossen Einfluss gewinnen. Aus demselben Grund werden der mittlere und äussere Messingring 12 Mal parallel kurzgeschlossen.

Rein ohmscher Teiler - niederohmig - 16.5 kΩ												
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index			
0	0			50	50	50			16.62 Scope 9			
0	47.5			50	50	50			18.5 Scope 13			
1000	0			50	50	50			6.14 Scope 11			
1000	47.5			50	50	50			13.48 Scope 15			
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index			
0	0	109.28	19.34	461.13	130	220			Scope 9			
0	47.5	2224	579.58	468.29	1000	2525			Scope 13			
1000	0	116.26	11.49	504.29	126.5	2.8			Scope 11			
1000	47.5	165.51	13.48	484.43	121	175			Scope 15			
<hr/>												
R.osz = 50 Ω												
Low-Impedance												
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index			
0	0			50	50	50			3.72 Scope 10			
0	47.5			50	50	50			1.84 Scope 14			
1000	0			50	50	50			2.77 Scope 12			
1000	47.5			50	50	50			5.13 Scope 16			
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index			
0	0	116.47	15.25	821.09	111	105			Scope 10			
0	47.5	127.9	24.24	1236.71	47.7	147.5			Scope 14			
1000	0	131.66	15.95	872.54	105	142.5			Scope 12			
1000	47.5	165.33	16.24	1250.06	76.5	142.5			Scope 16			

Tabelle 4: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

3.4 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 1.02 kΩ



Abbildung 25: Hochspannungselement mit 15 x 68 Ohm in Serie

3.4.1 Aufgaben 2.4.2B) 1.-3.

Rein ohmscher Teiler - niederohmig - 1.02 kΩ									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t)	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	0		5	5	100		13.68	353.1	105.71
0	47.5		5	5	50		12.26	1.09	24.44
1000	0		5	5	50		13.34	7.21	18.32
1000	47.5		5	5	50		25.23	0.319	26.17
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	0	105.71	33.11	129.41	340	180			Scope 21?
0	47.5	223.87	31.03	501.64	126	235			Scope 17
1000	0	78.96	37.04	728.17	54	110			Scope 23
1000	47.5	69.6	7.96	964.08	93.6	84			Scope 19
<hr/>									
R_osc = 50 Ω	Low-Impedance								
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ms	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	0		5	5	100		13.68	0.353	26.97
0	47.5		5	5	20		13.04	0.389	13.52
1000	0		5	5	50		23.58	1.85	24.57
1000	47.5		5	5	20		24.01	1.13	12.67
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	0	105.71	33.14	507.23	340	180			Scope 22
0	47.5	86.87	9.39	964.50	60	74			Scope 18
1000	0	134.5	26.65	959.71	114	151			Scope 25
1000	47.5	83.05	12.97	1895.03	45.5	80			Scope 20

Tabelle 5: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

3.4.2 Aufgabe 2.4.2B) 4. Zwei schwarze Elemente

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	0		5	5	500		13.9	197.7	29.21
1000	0		5	5	500		25.53	0	27.09
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	0	102.45	46.152	475.86	180	800			Scope 26
1000	0	137.12	61.5	942.41	360	375			Scope 27

Tabelle 6: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

3.4.3 Aufgabe 2.4.2B) 4. Ein schwarzes Element

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	0	5	5	100	13.643	0.39	30.78	1.76	Scope 28
1000	0	5	5	50	24.415	2.36	31.3	2.96	Scope 29
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	0	144.75	52.23	443.24	180	1200			Scope 28
1000	0	179.71	68.05	780.03	114	800			Scope 29

Tabelle 7: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

3.5 Rein kapazitiver Teiler

Rein kapazitiver Teiler									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	47.5	50	100	500	214.13	4.57	526.93	69.57	Scope 31
1000	47.5	50	100	500	215.99	3.64	463.79	6.91	Scope 32
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in ns	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	47.5	130.95	38.589	406.37	550	200			Scope 31
1000	47.5	711.31	14.04	465.71	450	650			Scope 32
<hr/>									
Bandbegrenzung									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	47.5	50	100	500	215.22	4.26	571.9	17.754	Scope 33
1000	47.5	50	100	500	216.11	3.42	462.59	6.94	Scope 34
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ns	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in μs	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	47.5	108.05	17.75	376.32	56.25	2000			Scope 33
1000	47.5	716.14	20.285	467.17	330	650			Scope 34

Tabelle 8: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

3.6 Gedämpft kapazitiver Teiler (Zaengl – Teiler)



Abbildung 26: Anordnung von Kondensatoren und Widerständen in Serie, eine von vielen Varianten

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch. 1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In μs	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Scope Index
0	47.5	50	100	1	216.88	1.04	468.63	2.58	Scope 35
1000	47.5								Scope 36
<hr/>									
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in μs	std. T in ns	Teilverhältnis F	Antwortzeit T in μs	Einschwingzeit t_e in ns			Scope Index
0	47.5	2.13	620.82	462.80	1.6	2050			Scope 35
1000	47.5								Scope 36

Tabelle 9: Messungen gemäss Messplan aus der Vorbereitung

4 Ergebnisblatt

4.1 Rein ohmscher Teiler – hochohmig

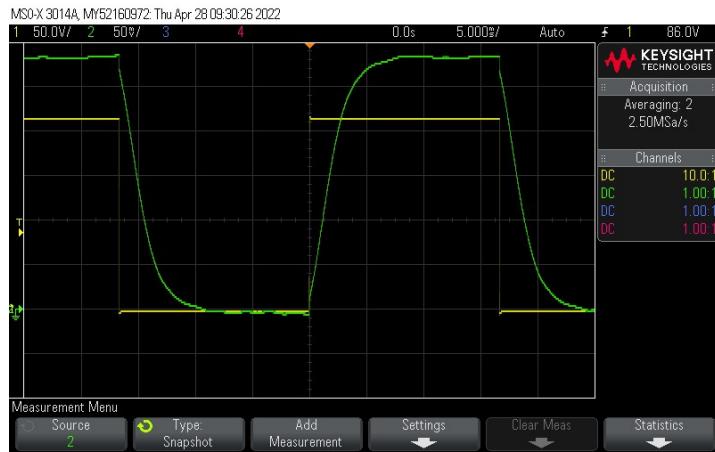


Abbildung 27: Allgemeiner, sich repetierender Verlauf der Sprungspannung. Hier: Mit Seriewiderstand und minimalem Dämpfungswiderstand. [Scope 0]

	R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch.1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ms	$u_1(t)$ in V	std. $u_1(t)$ in V	Messuns. $u_1(t)$	$u_2(t)$ in mV	std. $u_2(t)$ in mV	Messuns. $u_2(t)$	Teilverhältnis F	Messuns. F	F_berechnet	Scope Index	
0	0	0.0	50	50	1	217.1 +/- 5.97	0	5.972981	287.29 +/- 6.99	1.60	6.989810	755.682 +/- 1.21	1.209092	766.000	Scope 4	
1	0	47.5	50	50	10	217.1 +/- 5.97	0	5.972981	287.4 +/- 6.81	0.00	6.805616	755.393 +/- 0.0	0.000000	765.964	Scope 3	
2	1000	0.0	50	50	1	217.1 +/- 5.97	0	5.972981	286.9 +/- 6.93	1.36	6.933965	756.71 +/- 1.03	1.029125	767.000	Scope 7	
3	1000	47.5	50	50	10	217.1 +/- 5.97	0	5.972981	287.4 +/- 6.81	0.00	6.805616	755.393 +/- 0.0	0.000000	765.965	Scope 2	
	R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in ms	std. T in ms		Antwortzeit T in ms		Einschwingzeit t_e in ms							Scope Index	
0	0	0.0			3.70	69.600									3.90	Scope 4
1	0	47.5			3.86	42.080									5.00	Scope 3
2	1000	0.0			3.72	73.095									3.85	Scope 7
3	1000	47.5			3.89	32.370									5.00	Scope 2

Abbildung 28: Vollständige Messergebnisse zum rein ohmschen Teiler - hochohmig

Die Erdkapazität berechnet sich durch Umformen der Formel in 2.2.3.1 folgendermassen:

$$C_e = T_{hochohmig} \cdot \frac{6}{R_1} = 14.12 \pm 1.41 \text{ pF}$$

Wobei folgende, teils experimentell bestimmte, Werte verwendet wurde

$$T_{hochohmig,R_d,max,R_{abs},ja} = 1.8 \pm 0.18 \text{ ms}$$

$$R_1 = R_{HS} = 765 \pm 7.65 \text{ M}\Omega$$

Ergebnisblatt



Abbildung 29: Abfallende Flanke des hochohmigen Spannungsteilers. Ohne Abschlusswiderstand. Links mit minimalem Dämpfungswiderstand, rechts minimal

Da das Hochspannungselement hochohmig ist, ist der Effekt des Zuschaltens vom Abschluss- und Dämpfungswiderstand minimal. Im Mikrosekundenbereich Verhalten sich Schwingungen an den Flanken unterschiedlich und sind kleiner, je höher der zugeschaltete Widerstand ist.

Für den Massstabsfaktor gilt theoretisch und experimentell:

$$F_t = \frac{R_1 + R_2 + R_d + R_s}{R_2 + R_s} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{756 M\Omega + 1 M\Omega}{1 M\Omega} = 757 \quad (R_d \ll R_1, R_s \ll R_1,)$$

$$F_e \approx \frac{u_1}{u_2} = 755 \pm 2$$

Die beiden Massstabsfaktoren sind fast gleich und verändern sich bei An- und Abschluss vom Abschlusswiderstand und dem Dämpfungswiderstand ungefähr gleich.

Grund für den plötzlichen Spannungssprung am Anfang ist die Überschwingung β , welche abhängig vom eingestellten Dämpfungswiderstand ist. Je höher dieser gewählt wird, desto kleiner ist die Überschwingung. Gut ersichtlich ist dies in Abbildung 30.



Abbildung 30: Sprungantwort hochohmiger SPT. Links ohne Dämpfungswiderstand, rechts mit. [Scopes 5,6]

Ergebnisblatt

Die Grenzfrequenz berechnen wir mit der Formel unter 2.2.3.1

$$f_{g0} = \frac{4}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_e} \approx \frac{1.46}{R_1 \cdot C_e} = 135.16 \pm 13.49 \text{ Hz}$$

4.2 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 16.5 kΩ

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch.1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	Messuns. u_1(t)	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Messuns. u_2(t)	Teilverhältnis F	Messuns. F	F_berechnet	Scope Index	
0	0	0.0	50	50	50	+/- 6.83	4.62	6.830260	+/- 17.76	16.62	17.762216	461.134 +/- 7.66	7.664062	459.350	Scope 9
1	0	47.5	50	50	50	+/- 10.73	9.48	10.733221	+/- 19.52	18.50	19.521599	468.293 +/- 8.66	8.663516	487.129	Scope 13
2	1000	0.0	50	50	50	+/- 5.95	3.12	5.951421	+/- 8.69	6.14	8.691850	504.289 +/- 3.1	3.096360	459.330	Scope 11
3	1000	47.5	50	50	50	+/- 9.55	8.13	9.546117	+/- 14.77	13.48	14.769534	484.425 +/- 6.53	6.530158	487.110	Scope 15
R_d in Ω R_abs in Ω Abfallzeit T_a in ns std. T in ns Antwortzeit T in ns Einschwingzeit t_e in ns Scope Index															
0	0	0.0			109.28		19.34			130.0			220.0	Scope 9	
1	0	47.5			2224.00		579.58			1000.0			2525.0	Scope 13	
2	1000	0.0			116.26		11.49			126.5			2.8	Scope 11	
3	1000	47.5			165.51		13.48			121.0			175.0	Scope 15	

Abbildung 31: Vollständige Messergebnisse zum rein ohmschen Teiler - niederohmig - 16.5 kΩ

Das Zuschalten eines Dämpfungs- oder Serieabschlusswiderstand hat mehrere Effekte auf das Verhalten der Sprungantwort.

- Im Niederspannungselement
 - Längere Abfallzeiten (In Abbildung 32 mit einer Differenz von 15.19 ns und Abbildung 33 mit einer Differenz von 49.25 ns)
 - Überschwingungen werden kleiner (Abbildung 32)
 - Längere Einschwingzeiten
- Im Hochspannungselement
 - Höhere Spannungen vor und nach der Flanke
 - Überschwingungen werden kleiner



Abbildung 32: Unterschied ohne (links) versus mit (rechts) Dämpfungswiderstand. [Scopes 10,12]

Ergebnisblatt



Abbildung 33: Unterschied ohne (links) versus mit (rechts) Serieabschluss. [Scopes 11,15]

Vergleichen wir die in Kapitel 2.3.5 analytisch berechneten Werte für den Massstabsfaktor F, fällt uns auf, dass dieser mit dem gemessenen Wert gut übereinstimmt, sofern weder ein Dämpfungs- noch ein Serieabschlusswiderstand zugeschaltet ist. Die grösste Diskrepanz beobachten wir, wenn wir den Dämpfungswiderstand auf sein Maximum aufdrehen, der Serieabschlusswiderstand jedoch nicht angebracht ist. In diesem Fall liegt der gemessene Massstabfaktor bis zu 44.96 höher als der analytisch berechnete.

Stellt man nun am Oszillator eine Eingangsimpedanz von 50Ω anstelle der bisher verwendeten $1 M\Omega$ ein, liegt der gemessene Massstabfaktor F im Schnitt 1.78 mal so hoch wie der analytische Wert.

Hochfrequente Schwingungen im Spannungsabfall können auf die automatisch mit dem DSO ermittelte Abfallzeit einen erheblichen Einfluss haben. Betrachtet man Abbildung 34 genauer, fällt einem auf, dass die linke vertikale DSO-Messlinie «zu spät» gesetzt wurde, vergleiche man diese mit einer Durchschnittskurve von U_2 , welche schon früher unter die obere horizontale 90%-DSO-Messlinie fallen würde. Analog dazu erkennen wir das gleiche Phänomen bei der rechten vertikalen DSO-Messlinie, die hingegen «zu früh» gesetzt wurde.



Abbildung 34: Sprungantwort niederohmiger SPT, Einfluss hochfrequenter Schwingungen [Scope 9]

Ergebnisblatt

Für die Berechnung der Erdkapazität verwenden wir erneut die Formel

$$C_{e,niederohmig} = T_{niederohmig} \cdot \frac{6}{R_1} = 44 \pm 6.95 \text{ nF}$$

Wobei folgende, teils experimentell bestimmte, Werte verwendet wurde

$$T_{niederomig,R_d,max,R_{abs},ja} = 121 \pm 12.1 \text{ ns}$$

$$R_1 = R_{HS} = 16.5 \pm 0.825 \text{ k}\Omega$$

Im Vergleich zum vorherigen, hochohmigen Aufbau:

$$C_{e,hochohmig} = T_{hochohmig} \cdot \frac{6}{R_1} = 14.12 \pm 1.41 \text{ pF}$$

4.3 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – 1.02 kΩ

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch.1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	Messuns. u_1(t)	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Messuns. u_2(t)	Teilverhältnis F	Messuns. F	F_berechnet	Scope Index	
R_d in Ω		R_abs in Ω		Abfallzeit T_a in ns		std. T in ns		Antwortzeit T in ns		Einschwingzeit t_e in ns		Scope Index			
0	0	0.0	50	50	50	112.9 +/- 5.82	2.92	5.821263	137.5 +/- 6.41	3.72	6.406798	821.091 +/- 3.05	3.054532	488.500	Scope 10
1	0	47.5	50	50	50	114.89 +/- 5.67	2.57	5.665827	92.9 +/- 5.25	1.84	5.245141	1236.706 +/- 2.28	2.275707	628.546	Scope 14
2	1000	0.0	50	50	50	116.72 +/- 5.61	2.41	5.606421	133.77 +/- 5.88	2.77	5.880307	872.542 +/- 2.42	2.417010	553.083	Scope 12
3	1000	47.5	50	50	50	103.88 +/- 12.01	10.93	12.009954	83.1 +/- 7.07	5.13	7.065788	1250.06 +/- 6.41	6.414157	666.598	Scope 16
R_d in Ω		R_abs in Ω		Abfallzeit T_a in ns		std. T in ns		Antwortzeit T in ns		Einschwingzeit t_e in ns		Scope Index			
0	0	0.0		116.47		15.25		111.0		105.0		Scope 10			
1	0	47.5		127.90		24.24		47.7		147.5		Scope 14			
2	1000	0.0		131.66		15.95		105.0		142.5		Scope 12			
3	1000	47.5		165.33		16.24		76.5		142.5		Scope 16			

Abbildung 35: Vollständige Messergebnisse zum rein ohmschen Teiler - niederohmig - 1.02 kΩ

Wie in Kapitel 4.2 , beeinflussen auch hier der Dämpfungs- und der Serieabschlusswiderstand das Verhalten der Sprungantwort in denselben Kategorien. Besonders auffallend in Abbildung 36 ist die Spannung U₁, welche sich nach Anschließen des Dämpfungswiderstand fast verdoppelt hat. Diese grosse Auswirkung ist daran geschuldet, dass wir das letzte Mal im Hochspannungselement einen Gesamtwiderstand von 16.5 kΩ hatten und nun nur noch 1.02 kΩ. Da der Dämpfungswiderstand mit seinen 1 kΩ jetzt also fast gleich gross ist wie das Hochspannungselement, hat er dementsprechend auch viel grösseren Einfluss auf den Spannungsverlauf von U₁ und U₂.

Ergebnisblatt

Wir erachten es als «sinnvoll», die Überschwingungen möglichst zu reduzieren und wählen deshalb für den Dämpfungswiderstand den maximalen Wert von 1 kΩ.



Abbildung 36: Unterschied ohne (links) versus mit (rechts) Dämpfungswiderstand. [Scopes 22,25]

Für den Massstabsfaktor gilt theoretisch und experimentell:

$$F_t = \frac{R_1 + R_2 + R_d + R_S}{R_2 + R_S} \approx \frac{R_1 + R_2 + R_d}{R_2} = \frac{1.02 \text{ k}\Omega + 2.23 \Omega + 1 \text{ k}\Omega}{2.23 \Omega} = 906.83 \quad (R_S \ll R_1,)$$

$$F_e \approx \frac{u_1}{u_2} = 956 \pm 86.12$$

Der berechnete Wert für F liegt also innerhalb der Messunsicherheit des gemessenen Wertes.

Wir untersuchen nun die Auswirkung der DSO-Eingangsimpedanz und stellen folgende Veränderungen bei einem Schritt von 1 MΩ zu 50 Ω Eingangsimpedanz fest (siehe Abbildung 37):

- Die Spannung U₁ nimmt etwas zu, liegt aber noch im Bereich der Messunsicherheit
- Die Spannung U₂ ist vor der abfallenden Flanke nur noch halb so gross
- Die Abfallzeit beträgt nur noch rund einen drittel



Abbildung 37: Effekt der DSO Eingangsimpedanz. Links 1 MΩ, rechts 50 Ω. [Scopes 17, 18]

Ergebnisblatt

Die Grenzfrequenz berechnen wir mit der Formel unter 2.2.3.1 :

$$f_{g0} = \frac{4}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_e} \approx \frac{1.46}{R_1 \cdot C_e} = 1.59 \pm 0.168 \text{ MHz}$$

Wobei folgende, teils experimentell bestimmte, Werte verwendet wurden

$$C_{e,niederohmi} = T_{niederohmig} \cdot \frac{6}{R_1} = 900 \pm 42.9 \text{ pF}$$

$$T_{niederomig,R_d,max,R_{abs},ja} = 153 \pm 15.3 \text{ ns}$$

$$R_1 = 1.02 \pm 0.051 \text{ k}\Omega$$

Asymmetrischer Aufbau mit zwei schwarzen Elementen (2x 4.3 Ω):



Abbildung 38: Vergleich symmetrischer Aufbau (links) mit asymmetrischem Aufbau (rechts) [Scopes 23, 27]

Asymmetrischer Aufbau mit einem schwarzen Element(2.15) Ω



Abbildung 39: Vergleich der beiden asymmetrischen Aufbauten. Links mit zwei schwarzen Elementen, rechts mit einem. [Scopes 27, 29]

Merkmale des asymmetrischen Aufbaus:

- Der gemessene Massstabsfaktor F mit zwei schwarzen Elementen liegt im Bereich des analytisch berechneten. Mit einem schwarzen Element ist der berechnete Wert zu gross.
- Es werden längere Abfallzeiten gemessen. Das System benötigt länger, um sich einzuschwingen.
- U_2 fällt nicht so stark ab wie im symmetrischen Fall.

4.4 Rein kapazitiver Teiler

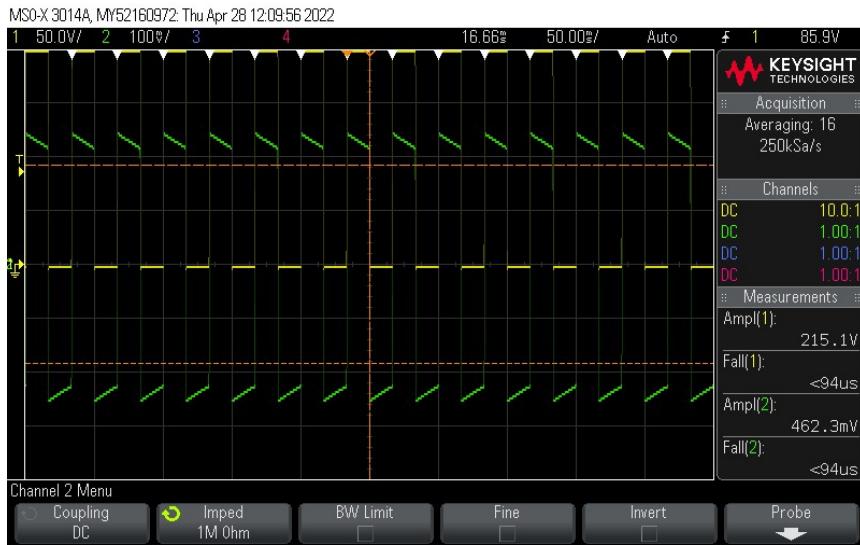


Abbildung 40: Allgemeiner, sich repetierender Verlauf der Sprungspannung. Hier: Kapazitiver SPT mit Seriewiderstand und minimalem Dämpfungswiderstand. [Scope 30]



Abbildung 41: Auswirkung eines zugeschalteten Dämpfungswiderstand (rechts) versus ohne (links). [Scopes 31,32]



Abbildung 42: Bandbegrenzung aus (links) und eingeschaltet (rechts). [Scopes 32,34]

Ergebnisblatt

Die Grenzfrequenz des Teilers lässt sich, neben anderen möglichen Varianten, wieder mit folgender Formel berechnen: $f_{g0} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx \frac{2.2}{T_\alpha}$

Die Streukapazität C_E sowie die Kabelkapazität C_K haben einen direkten Einfluss auf den Messfehler des Übersetzungsverhältnis. C_K berechnet sich mit: $C_K = l \cdot C'_K$

Die gemessenen Werte für den Massstabsfaktor F liegen im Bereich des analytisch berechneten. Dies unterstützt die Behauptung, dass die Kettenleiterbetrachtung hier gültig ist.

Für die Messung und Betrachtung der Symmetrierungsfehler verblieb am Versuchstag keine Zeit.

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch.1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	Messuns. u_1(t)	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Messuns. u_2(t)	Teilverhältnis F	Messuns. F	F_berechnet	Scope Index	
0	0	47.5	50	100	500	214.13 +/- 7.5	4.57	7.495144	526.93 +/- 70.32	69.5710	70.320391	406.373 +/- 28.27	28.271761	468.229	Scope 31
1	1000	47.5	50	100	500	215.99 +/- 6.98	3.64	6.984403	463.79 +/- 11.57	6.9099	11.567794	465.706 +/- 3.22	3.217995	468.229	Scope 32
R_d in Ω R_abs in Ω Abfallzeit T_a in ns std. T in ns Antwortzeit T in ns Einschwingzeit t_e in ns Scope Index															
0	0	47.5				130.95		38.589		550			200	Scope 31	
1	1000	47.5				711.31		14.040		450			650	Scope 32	

Abbildung 45: Vollständige Messergebnisse zum rein kapazitiven Teiler

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch.1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. In ns	u_1(t) in V	std. u_1(t) in V	Messuns. u_1(t)	u_2(t) in mV	std. u_2(t) in mV	Messuns. u_2(t)	Teilverhältnis F	Messuns. F	F_berechnet	Scope Index	
0	0	47.5	50	100	500	215.22 +/- 7.32	4.26	7.319855	571.9 +/- 20.85	17.754	20.853349	376.325 +/- 6.68	6.681270	468.229	Scope 33
1	1000	47.5	50	100	500	216.11 +/- 6.87	3.42	6.873445	462.59 +/- 11.57	6.940	11.571397	467.174 +/- 3.24	3.242196	468.229	Scope 34
R_d in Ω R_abs in Ω Abfallzeit T_a in ns std. T in ns Antwortzeit T in μs Einschwingzeit t_e in ns Scope Index															
0	0	47.5				108.05		17.750		56.25			2000	Scope 33	
1	1000	47.5				716.14		20.285		330.00			650	Scope 34	

Abbildung 43: Abbildung 44: Vollständige Messergebnisse zum rein kapazitiven Teiler mit Bandbegrenzung

Ergebnisblatt

4.5 Gedämpft kapazitiver Teiler (Zaengl Teiler)

R_d in Ω	R_abs in Ω	Ch.1 Div. In V	Ch. 2 Div. In mV	Time Div. in μs	u_1(t) in V	u_1(t) in V	std. u_1(t)	Messuns. u_1(t)	u_2(t) in mV	u_2(t) in mV	std. u_2(t)	Messuns. u_2(t)	Teilverhältnis F	Messuns. F	F_berechnet	Scope Index
0	0	47.5	50.0	100.0	1.0	216.88 +/- 6.06	1.038	6.060141	468.63 +/- 9.7	2.58	9.699351	462.796 +/- 1.19	1.194015	462.661	Scope 35	
1	1000	47.5	NaN	NaN	NaN	nan +/- nan	NaN	NaN	nan +/- nan	NaN	NaN	nan +/- nan	NaN	NaN	NaN	Scope 36
R_d in Ω	R_abs in Ω	Abfallzeit T_a in μs	std. T in ns	Antwortzeit T in μs	Einschwingzeit t_e in ns	Scope Index										
0	0	47.5	2.13	620.82	1.6	2050.0	Scope 35									
1	1000	47.5	NaN	NaN	NaN	NaN	Scope 36									

Abbildung 46: Messergebnisse zum gedämpft kapazitiven Teiler (nicht ganz vollständig aufgrund von Zeitmangel)



Abbildung 47: Vergleich des Zaengl-Teilers mit minimalem (links) und maximalem Dämpfungswiderstand [Scopes 35, 36]

Vergleichen wir den Zaengl-Teiler mit dem kapazitiven Teiler, fällt uns auf, dass die Schwingungen der Sprungantwort beim Zaengl-Teiler weniger ausgeprägt sind. Dies liegt an den Widerständen im Zaengl-Teiler, die eine Dämpfende Wirkung erzielen. Jedoch gehen damit längere Einschwingzeiten einher.

Für die Grenzfrequenz gilt:

$$f_{g0} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} \approx \frac{2.2}{2\pi \cdot T_\alpha} \approx \frac{0.35}{T_\alpha}$$

$$T = \frac{T_\alpha}{2.2}$$

$$T_{Zaengl} = \frac{R_1 \cdot C_e}{6}$$

Dabei bewegt sich der gemessene Wert für den Massstabsfaktor im Bereich des analytisch berechneten.

5 Diskussion

Alle Hochspannungsteiler reduzieren mittels Übersetzungsverhältnis eine hohe Eingangsspannung auf eine tiefe Ausgangsspannung. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Merkmale der untersuchten Teiler, wie zum Beispiel die Dämpfung oder das Teilverhältnis, diskutiert.

5.1 Rein ohmscher Teiler – hochohmig

Der verhältnismässig kleine Widerstand R_d ist in Serie mit dem hochohmigen R_1 geschalten, deshalb ist er für das Teilverhältnis F vernachlässigbar. Dies ist sowohl formell als auch experimentell zu sehen. Das Gleiche gilt auch für den Serienabschlusswiderstand. Ebenso haben Widerstände keinen Einfluss auf den Verlauf zeitlich veränderlicher Grössen. In 4.1 ist ersichtlich, wie nahe der berechnete zum gemessenen Wert ist.

Der Teiler hat eine Grenzfrequenz von $135 \pm 13.49\text{Hz}$. Dadurch ist er für Niederfrequente Wechselspannungen sowie Gleichspannung geeignet, allerdings auf Kosten der Antwortzeit, die, in Relation zu anderen Teilern, relativ hoch ist.

Anhand des Spannungsverlaufs der Sprungfunktion, der einer Exponentialkurve ähnelt, sieht man die parallele zu dem idealen RC Glied.

Ein weiterer interessanter Punkt ist, dass durch den hohen Widerstand nur sehr kleine Ströme fliessen. Dadurch lassen sich auch Zeitintensivere Messungen durchführen.

Der signifikante Spannungssprung am Anfang der Sprungspannung tritt aufgrund des Verhältnisses zwischen der Parallelkapazität C_p und der Erdstreukapazität C_e auf.

Der berechnete Wert für die Erdstreukapazität C_e in Kapitel 4 unterscheidet sich zu jenem explizit berechneten Wert für den rein hochohmschen Teiler C_e (vgl. Kapitel 4.1). Dieser Unterschied kommt daher, dass C_e einer Vereinfachung unterliegt. Die Schaltung wurde vereinfacht, sodass $L = 0$ und $C_p = 0$. Die Grenzfrequenz und die Sprungantwort entsprechen somit einem reinem RC-Verhalten.

5.2 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – $16.5\text{k}\Omega$

Die berechneten und experimentell bestimmte Werte sind auch bei diesem Teiler relativ ähnlich. Die hohe Abweichung mit hohem Dämpf- und ohne Abschlusswiderstand ist schwierig zu erklären und könnte ein Messfehler sein.

Im Unterschied zum Hochohmigen Teiler, sind die Ströme vergleichsweise hoch, was den Teiler für Zeitintensivere Messungen ungeeignet macht.

Die Bandbreite ist höher als bei dem hochohmigen Teiler, was ihn im Bereich Stossspannungs- oder Blitzmessungen nützlicher macht.

5.3 Rein ohmscher Teiler – niederohmig – $1,02\text{k}\Omega$

Dieser Teiler hat von den rein ohmschen Teilern die höchste Bandbreite und zieht am meisten Leistung von der Quelle. Damit eignet sich er sich am besten für die Messungen an Blitz- und Stossspannungen und weniger für AC/DC Messungen.

Diskussion

Aus zeitlichen Gründen konnten wir die unsymmetrischen Messungen nicht mehr durchführen. Wir haben jedoch schon bei der letzten Messung, als wir die Kapazitäten im NS-Teil kurzgeschlossen hatten, diskutiert, dass es aus parasitär-induktiven Gründen Sinn macht, 12 Kurzschlüsse parallel zu verwenden, anstatt nur einen einzigen, da dadurch die Induktivitäten des Systems reduziert werden. Wir gehen also davon aus, dass wir vermutlich bei diesen Messungen wesentliche Unterschiede hätten sehen können. Vor allem in den Ausprägungen der Schwingungen der Sprungantwort.

5.4 Rein kapazitiver Teiler

Beim kapazitiven Teiler ist der Einfluss der Widerstände (Dämpfungswiderstand, Serieabschluss, etc.) am grössten, da sonst keine anderen Dämpfenden Elemente wirken. Das bedeutet in der Theorie ein unendliches Weiterschwingen, in der Praxis jedoch dämpfen parasitäre Elemente die Sprungantwort auf einen endlichen Wert.

Man sieht bei den Messungen, dass der Abschlusswiderstand essenziell ist. Ohne diesen sind die Schwankungen am Ausgang extrem gross. Mit beiden Widerständen wird die auftretende Oszillation gut gedämpft, die Antwortzeit gekürzt und somit für höhere Frequenzen einsetzbar gemacht.

5.5 Gedämpft kapazitiver Teiler (Zaengl Teiler)

Bei dem Zaengl Teiler ist der Einfluss des Dämpfungswiderstandes und auch des Abschlusswiderstandes am besten sichtbar (Abbildung 47). Die im Gegensatz zu anderen Teilern längeren Einschwingzeiten können mit den beiden Widerständen gut geglättet werden.

6 Eigenständigkeitserklärung

Das Messprotokoll haben wir während des Versuchstages gemeinsam erstellt, dabei haben wir abwechselnd vom Oszilloskop abgelesen und die Ergebnisse notiert.

Die Einführung, Auswertung, Berechnung der Messunsicherheiten und die Diskussion haben wir gemeinsam zu gleichen Teilen erstellt.

