

Hochspannungsteiler

Laborbericht / Versuchsprotokoll des Laborpraktikas Nr.4

Gallus Kaufmann, 16-921-223

Nando Galliard, 14-938-211

Serafin Herger, 14-932-040

227-0117-10L Mess- und Versuchstechnik

ETH Zürich

23.04.2020

Hinweis:

Dieser Bericht wurde zu gleichen Teilen verfasst von Nando Galliard, Serafin Herger und Gallus Kaufmann.

Contents

1 Einführung	3
1.1 Versuchsziel	3
1.2 Theorie	3
1.2.1 Ohmscher Teiler	6
1.2.2 Hochohmscher Teiler	7
1.2.3 Niederohmiger Teiler	7
1.2.4 Kapazitiver Spannungsteiler	7
1.2.5 Gedämpfter kapazitiver Spannungsteiler (Zaengl-Teiler)	8
1.2.6 Ohmsch-Kapazitiver Spannungsteiler	9
1.3 Versuchsaufbau	10
1.3.1 Messplan	11
1.4 Messunsicherheiten	12
1.4.1 Toleranzen der Bauteile des Hochspannungsteilers und des Niederspannungsteilers	12
1.4.2 Messunsicherheiten der Spannung	13
1.5 Ergänzende Einführung	14
2 Messprotokoll	15
2.1 Verwendete Infrastruktur	15
2.1.1 Umgebungsbedingungen	15
2.1.2 Verwendete Geräte	15
2.2 Messaufbau	16
2.2.1 Messergebnisse: Rein ohmscher Teiler - hochohmig	17
2.2.2 Messergebnisse: Rein ohmscher Teiler mit $16.5\ \Omega$ - niederohmig	17
2.2.3 Messergebnisse: Rein ohmscher Teiler mit $1.02\ k\Omega$ - niederohmig	18
2.2.4 Messergebnisse: Rein kapazitiver Teiler	19
2.2.5 Messergebnisse: Gedämpft kapazitiver Teiler - (Zaengl-Teiler)	21
3 Messunsicherheiten	22
4 Ergebnis	23
4.1 Rein ohmscher Teiler - hochohmig	23
4.2 Ohmscher Teiler mit $16.5k\Omega$ - niederohmig	24
4.3 Ohmscher Teiler mit $1.02k\Omega$ - niederohmig	25
4.3.1 Aufbau 1	25
4.3.2 Aufbau 2	26
4.3.3 Aufbau 3	26
4.4 Rein kapazitiver Teiler	27
4.4.1 Aufbau 1	27
4.4.2 Aufbau 2	28
4.4.3 Aufbau 3	28
4.5 Zaengl-Teiler	29
4.6 Zusammenfassung Ergebnisse	30

5 Diskussion	32
5.1 Ergebnisse	32
5.1.1 Rein ohmscher Teiler - hochohmig	32
5.1.2 Ohmscher Teiler mit $16.5\text{k}\Omega$	32
5.1.3 Ohmscher Teiler mit $1.02\text{k}\Omega$	33
5.1.4 Rein kapazitiver Teiler	33
5.1.5 Zaengl Teiler	34
5.2 Messunsicherheiten	34
6 Anhang	35

1 Einführung

1.1 Versuchsziel

Die Aufgabe dieses Versuches ist es, die frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften von typischen Teilerschaltungen mit Hilfe von einem modular aufgebauten Modell-Spannungsteiler zu untersuchen. Die Übertragungseigenschaften der verschiedenen Teilerschaltungen sollen im Anschluss aus den Sprungantwortmessungen bestimmt und verglichen werden.

1.2 Theorie

Ein handelsübliches Digital Oszilloskop (DSO) kann mit einer "Tastkopf"-Erweiterung für Spannungen bis zu einigen kV genutzt werden. Bei höheren Spannungen von mehreren 10 kV bis zu mehreren 100 kV oder MV werden sogenannte Hochspannungsteiler eingesetzt. Diese führen zu einer linearen Verkleinerung der Eingangsspannung, sodass sich das Signal mit einem DSO messen lässt. Die Grundschaltung eines Hochspannungsteiler sieht folgendermassen aus:

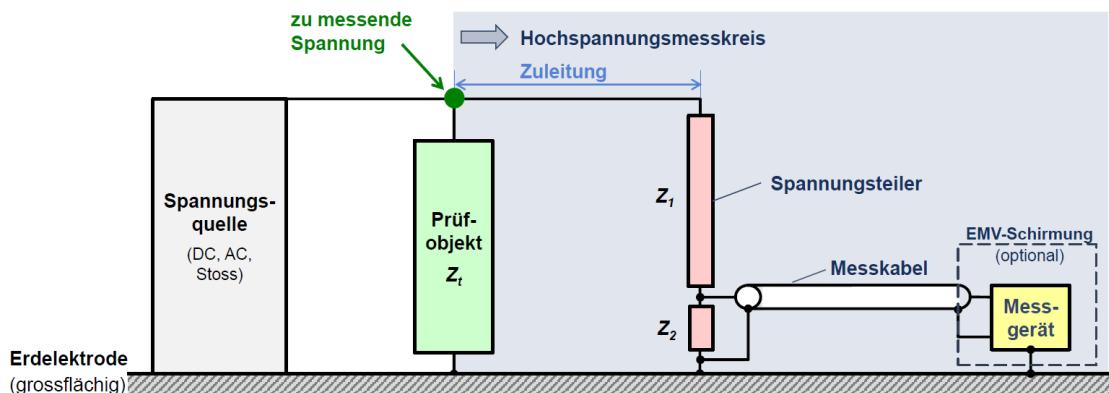


Figure 1: Grundaufbau eines Hochspannungsteilers [3]

Der Spannungsteiler Z_1 aus Abb. 1 beinhaltet das folgende Kettenleiterersatzschaltbild bestehend aus homogen verteilten Längs- und Querimpedanzen.

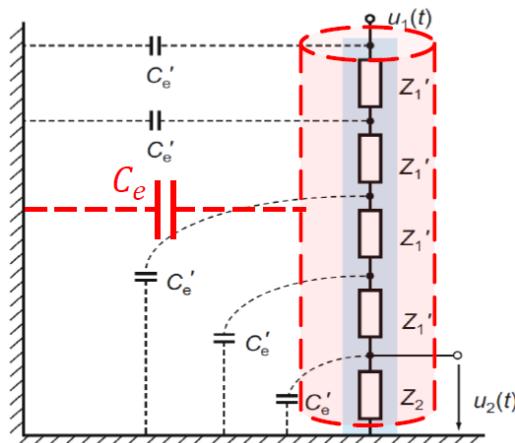


Figure 2: Kettenleiterersatzschaltbild mit parasitären Erdstreukapazitäten C_e' [3]

Aufgrund der Komplexität des Aktivteils (bestehend aus Z, R oder C) wird dieser durch einen Metallzylinder ersetzt. Mit dieser Vereinfachung lässt sich die Erdkapazität C_e berechnen und es ergibt sich die folgende Näherung:

$$C_e = n \cdot C'_e = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{l}{d})} \quad (1)$$

Wobei C'_e : parasitäre Erdstreuukapazitäten, n : Anzahl der C'_e , d : Durchmesser der Bauelemente, l : Länge (Teilerhöhe), l/d : Schlankheitsgrad

Um eine Aussage über die Eigenschaften eines Hochspannungsteilers zu machen, muss die Sprungantwort genauer untersucht werden. Hierzu wird der ideale RC-Tiefpass betrachtet.

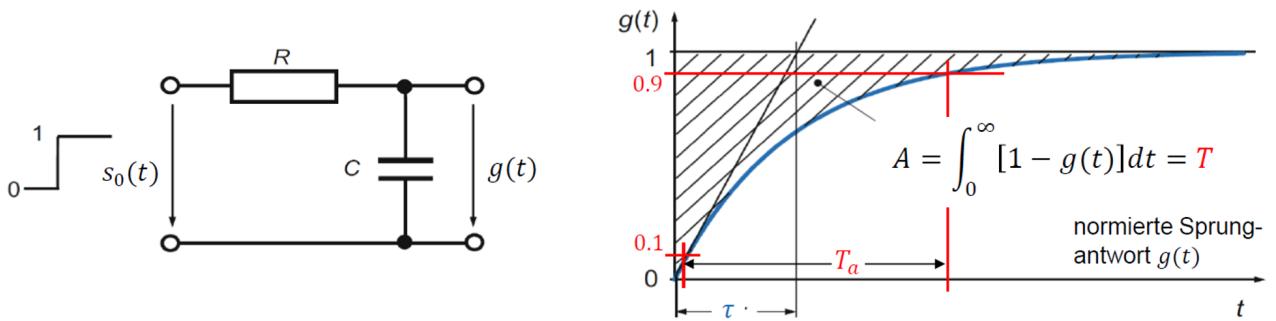


Figure 3: Idealer RC-Tiefpass mit exponentiell ansteigender Sprungantwort $g(t)$. [3]

Die Sprungantwort einer RC-Schaltung im Zeitbereich [3] ist gegeben durch:

$$g(t) = 1 - e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Diese Sprungantwort wird als normiert definiert, um das Verhalten eines Hochspannungsteilers zu beschreiben. Des Weiteren sind die folgenden Parameter [2] für Hochspannungsteiler interessant:

- **Antwortzeit T :** Ermöglicht eine Abschätzung des Scheitelwertfehlers und ist für den idealen Tiefpass gegeben durch

$$T = \tau = RC = A \quad [T] = \text{s}, [R] = \Omega, [C] = \text{F} \quad (3)$$

- **Anstiegzeit bzw. Abfallzeit T_a :** Die Zeitdauer, welche die ansteigende (abfallende) Flanke braucht, um von 10% auf 90%, (von 90% auf 10%) des Endwertes abzufallen und ist für den idealen Tiefpass gegeben durch

$$T_a = t_{90\%} - t_{10\%} = \tau \ln \frac{1 - 0.1}{1 - 0.9} \approx 2.2\tau \quad [T_a] = \text{ns} \quad (4)$$

- **Grenzfrequenz f_{go} :** Die Frequenz bei der die Signalamplitude unter 3dB sinkt und ist für den idealen Tiefpass gegeben durch

$$f_{go} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} \approx \frac{2.2}{2\pi \cdot T_a} \approx \frac{0.35}{T_a} \quad [f_{go}] = \text{MHz} \quad (5)$$

- **Einschwingzeit t_E :** Die Einschwingzeit beschreibt die für die Einschwingung eines Signal benötigte Zeit. Theoretisch wird er ab dem Zeitpunkt als beendet angesehen, wenn sich die Signalgrösse nur noch um $\pm 5\%$ des Endwertes des Sollsignals unterscheidet.

$$|T = \int_{O_1}^t [1 - g(t)]dt| \leq 0.05 \cdot t_E \quad (6)$$

- **Überschiessen β :** Gibt den grössten Wert an, um welchen die schwingende Einheitssprungantwort das Referenzniveau übersteigt.

Diese Sprungantwort $g(t)$, die Anstiegszeit T_α , die Einschwingzeit, das Überschiessen und die Grenzfrequenz gelten auch für Systeme mit annähernd exponentiell ansteigendem Verlauf. Z.B. auch für die experimentelle Sprungantwort $g(t)$ in der nachfolgenden Abbildung eines realen Spannungsteilers bzw. eines schwingenden Systems.

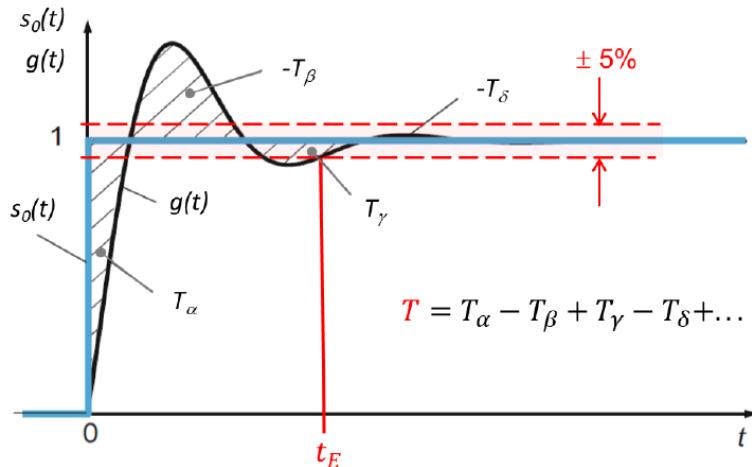


Figure 4: Experimentelle Sprungantwort $g(t)$ eines schwingenden Systems. [3]

- **Antwortzeit T** für das in Abb. 4 dargestellte System

$$T = \int_0^{2t_{max}} [1 - g(t)]dt = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_{delta} + \dots \quad (7)$$

Je nach Art und Weise des Aufbaus eines Hochspannungsteilers ergibt sich eine andere Bandbreite und Messgenauigkeit. In der folgenden Abbildung sind die Grundschaltungen von verschiedenen Hochspannungsteilern und deren Anwendungsbereiche ersichtlich. Diese werden nachfolgend detaillierter behandelt.

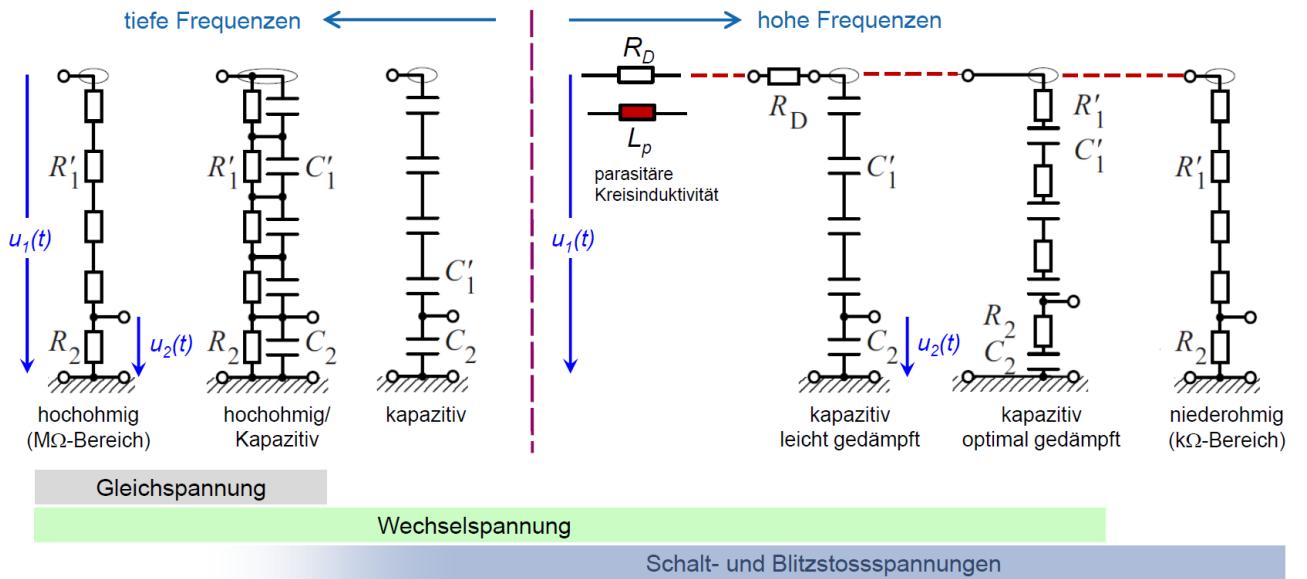


Figure 5: Bauarten und Anwendungsbereiche [3]

1.2.1 Ohmscher Teiler

Für einen Ohmschen Spannungsteiler wie in Abbildung 6 kann der Massstabsfaktor F mit Formel (8) berechnet werden. Diese Berechnungsart ist allerdings bei höheren Frequenzen meist nicht mehr gültig, da das Überschaltungsverhalten durch Erdkapazität und Induktivitäten der Bauteile zunehmend beeinflusst wird. Dann muss mindestens eine kritische Dämpfung R_{krit} (9) eingebaut werden, dass keine schwingende Sprungantwort $g(t)$ gemessen wird. Es folgen die Formeln aus der Vorlesung [3]:

$$\text{Masstabsfaktor: } F = \frac{u_1}{u_3} \approx \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_d + R_1 + R_2}{R_2} \quad (8)$$

$$\text{Kritische Dämpfung: } R_{krit} \approx 2\pi \sqrt{\frac{L}{C_e} \cdot \frac{1}{1 + \pi^2 C_p / C_e}} \quad (9)$$

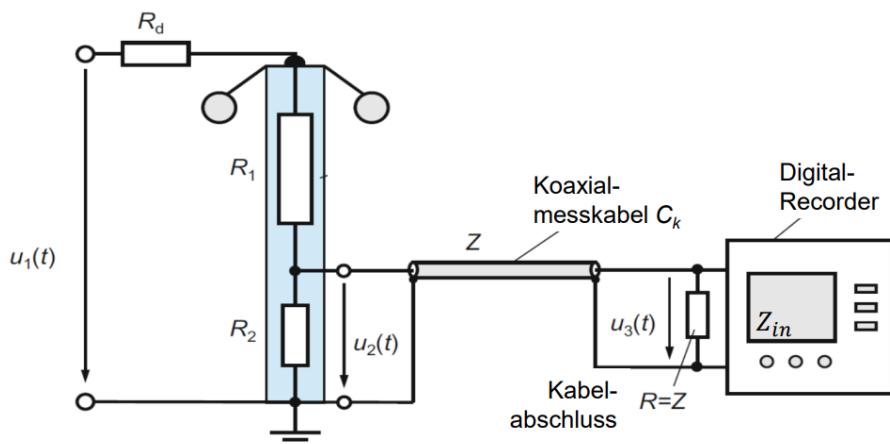


Figure 6: Aufbau für Hoch- bzw Niederohmscher Teiler mit Dämpfungswiderstand R_d [3]

1.2.2 Hochohmscher Teiler

Hochohmsche Teiler sind ausschliesslich für DC- Spannungsmessungen geeignet, da aufgrund der Erdstreckukapazitäten sich ein RC-Kettenleiter mit markantem Tiefpassverhalten bildet. Die parasitären Induktivitäten L und Kapazitäten C_p fallen extrem klein aus, da die Widerstände der kurzen Kabellängen im Vergleich zu dem hochohmschen Teiler mit $R \geq 10 \text{ k}\Omega$ vernachlässigbar sind. Dadurch lässt sich die Grenzfrequenz f_{go} und die Antwortzeit T bestimmen zu [3] :

$$f_{go} = \frac{4}{2\pi R_1 C_e} = \frac{1.46}{R_1 C_e} \quad (10)$$

$$T = \frac{R_1 C_e}{6} \quad (11)$$

Dabei ist R_1 der totale Widerstand des Hochspannungsteilers und C_e die Erdkapazität gegeben durch Gleichung (1).

1.2.3 Niederohmiger Teiler

Der Niederohmsche Teiler ist eher ungeeignet für DC- und AC- Spannungen bedingt durch einen hohen Stromeinfluss und somit resultierenden Verlusten. Ihr Einsatzgebiet liegt in der Messung von Blitzstossspannungen und Schaltstossspannungen. Dabei liegt der HS-Widerstand zwischen 2 - 20 $\text{k}\Omega$ für die Blizstossspannungen und im oberem $\text{k}\Omega$ -Bereich bei den Schaltstossspannungen. Der NS-Teil kann zu grossen Störungen der Sprungantwort $g(t)$ führen bedingt durch die parasitären Effekte der Induktivität und Parallelkapazitäten. Aus diesem Grund wird das Koaxialkabel des Oszilloskops mit einem Wellenwiderstand ergänzt.

1.2.4 Kapazitiver Spannungsteiler

Der kapazitive Spannungsteiler teilt die hohe Wechselspannung auf eine stark verkleinerte Spannung auf, um sie dann mit einem analogen oder digitalen Messgerät messbar zu machen. Die für den Bau benötigten Kondensatorelemente bestehen meistens aus einem Wickel mit Öl-Papier-Isolierung oder gasimprägnierter Kunststofffolie. Das Ersatzschaltbild des Teilers kann in Abbildung 7 eingesehen werden.

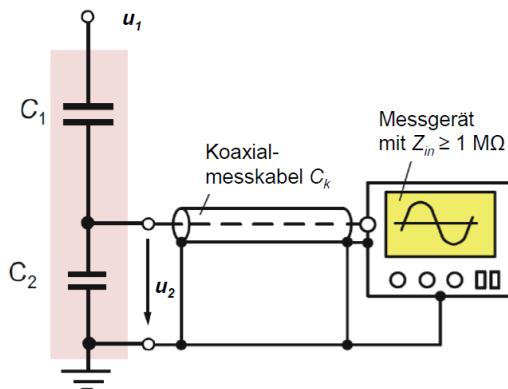


Figure 7: Ersatzschaltbild kapazitiver Teiler [3]

Daraus ergibt sich der Messstabfaktor F zu:

$$F = \frac{u_1}{u_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = 1 + \frac{C_2}{C_1} \quad (12)$$

Dazu muss allerdings noch die Kabelkapazität C_k berücksichtigt werden. Somit ergibt sich die Formel (13).

$$F = \frac{u_1}{u_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} = 1 + \frac{C_2 + C_K}{C_1} \quad (13)$$

Unter Berücksichtigung von der Streukapazität C_e wird C_1 zu $C_1 - C_e/6$ [3] und damit der ideale C-Teiler mit Einfluss der Streukapazität C_e zu:

$$F = \frac{u_1}{u_2} = 1 + \frac{C_2 + C_K}{C_1 - \frac{1}{6}C_e} \quad (14)$$

Aus Gleichung (14) ist ersichtlich, dass der Messstabfaktor F des kapazitiven Spannungsteilers zwar frequenzunabhängig ist, und die Streukapazität einen Einfluss auswirkt.

1.2.5 Gedämpfter kapazitiver Spannungsteiler (Zaengl-Teiler)

Der Zaengl-Teiler ist ein kapazitiver Teiler, bei welchem in sowohl dem Hochspannungs- wie auch Niederspannungsteil zusätzliche Serienwiderstände verbaut werden, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Dies dämmt die Resonanzerscheinungen ausreichend, die bei einem reinen kapazitiven Teiler zum Vorschein kommen. Er kombiniert somit die Vorteile der beiden zuvor behandelten Teiler. Für den Zaengl-Teiler ergibt sich die Antwortzeit T von [3]:

$$T = \frac{R_1 C_e}{6} \quad (15)$$

Bei der Dimensionierung des Teilers muss darauf geachtet werden, dass der Niederspannungsteil und der Kabelanschluss dem Abgleichskriterium bezüglich Messstabfaktor F eingehalten wird [3]:

$$F = \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1 + R_2 + R_d}{R_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} = \frac{L_1 + L_2}{L_2} \quad (16)$$

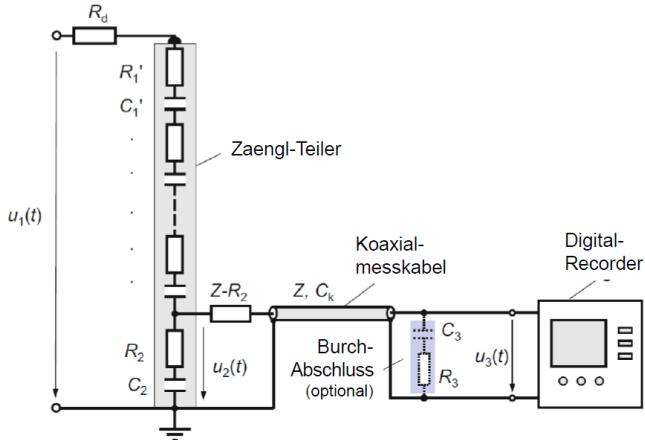


Figure 8: Ersatzschaltbild Zaengl Teiler ohne C_e gezeichnet [3]

1.2.6 Ohmsch-Kapazitiver Spannungsteiler

Ebenfalls ein kapazitiver Teiler, bei welchem in dem Hochspannungs- sowie Niederspannungsteil Parallelwiderstände ergänzt werden (ersichtlich in Abbildung 9). Heutzutage ist dieser Teiler die am meisten gebrauchte Teilerart für DC-, AC- und Stossmessungen und wird deshalb auch Universalteiler genannt. Er muss ebenfalls dimensioniert werden und ein Abgleich des Niederspannungsteiles gemacht werden, um den Messstabfaktor F zu berechnen (in nachfolgender Formel 17 für Niederfrequenz ohne C_e und L_1):

$$F = \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1 + R_2 + R_d}{R_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} \quad (17)$$

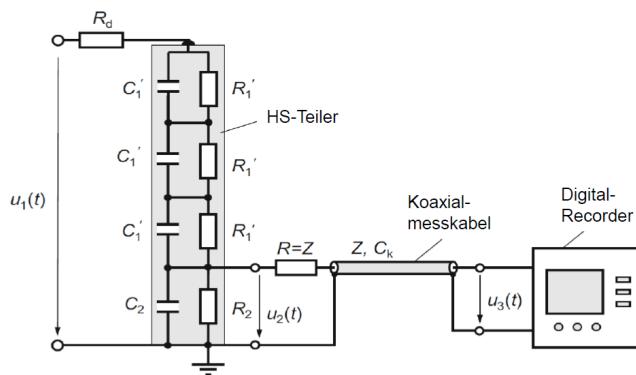


Figure 9: Ersatzschaltbild Ohmsch- Kapazitiver Teiler ohne C_e gezeichnet [3]

1.3 Versuchsaufbau

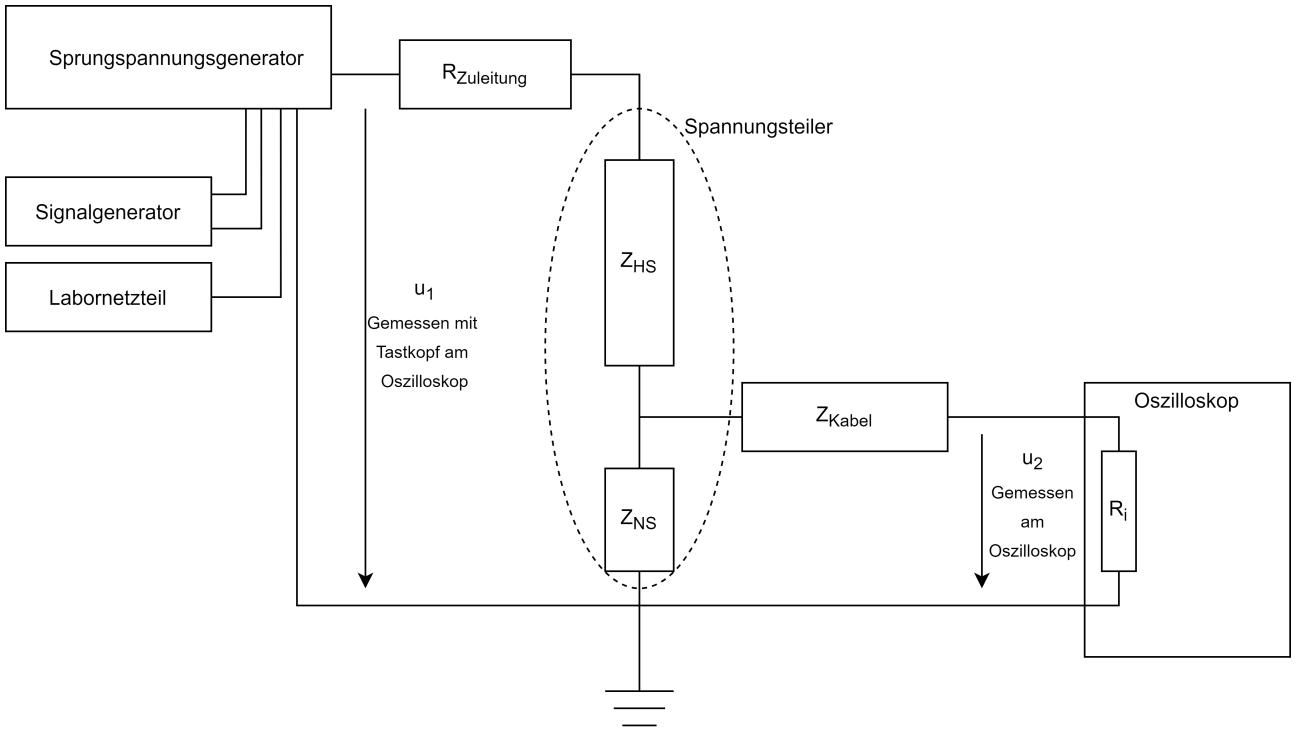


Figure 10: Versuchsaufbau.

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 10 zu sehen. Das eingezeichnete Z_{HS} ist die Impedanz des Hochspannungsteils und Z_{NS} die Impedanz des Niederspannungsteils. Der Sprungspannungsgenerator besteht aus dem Labornetzteil. Die elektrische Eigenschaft hängt nicht von der Amplitude der Spannungsbeanspruchung ab. Deshalb ist es auch korrekt, wenn in den folgenden Versuchen die Teilerexperimente mit verhältnismässig geringeren Spannungen durchgeführt werden in diesem Fall im Bereich von 15V - 220V [2].

In der folgenden Tabelle 1 sind die in diesem Versuch zu untersuchenden Aufbauarten des Spannungsteilers aufgelistet.

Versuch	Hochspannungsteil Z_{HS}	Niederspannungsteil Z_{NS}
(hochohmig) Rein ohmscher Teiler	765 MΩ (15 x 51 MΩ in Serie)	Z_{NS} befindet sich hier im Leerlauf. Das Oszilloskop bildet den 1 MΩ Widerstand für das Niederspannungsteil.
(niederohmig) Rein ohmscher Teiler mit 16.5 kΩ	16.5 kΩ (15 x 1100 Ω in Serie)	36 (12 x 432 Ω parallel)Ω
(niederohmig) Rein ohmscher Teiler mit 1.02 kΩ	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)
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 parallel) 150 nF (1 x einzeln)
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)

Table 1: verschiedene Versuchsanordnungen

1.3.1 Messplan

Die vorhin erwähnten Versuche werden gem. Abbildung 10 untersucht und folgende Messtabelle gemäss Aufgabenstellung [2] für jeden Versuch ausgefüllt:

Versuch	
Hochspannungsteil Z_{HS}	
Niederspannungsteil Z_{NS}	
Messung der Sprungantwort	
Teilverhältnis	
Abfallzeit T_a	
Experimentelle Antwortzeit T	
Einschwingzeit t_E	
Sprungspannungveränderung mit $R_d = \dots$	
Sprungspannungveränderung ohne 47.5Ω-Serienabschluss (vom Messkabel)	
Einfluss auf Teiler mit zusätzlicher Erdkapazität (Hand)	
Einfluss auf Teiler mit zusätzlicher Erdkapazität (Arm)	
Übertragungsverhalten mit 50Ω-Eingang des DSOs	

Table 2: Allgemeine Messtabelle

1.4 Messunsicherheiten

1.4.1 Toleranzen der Bauteile des Hochspannungsteilers und des Niederspannungsteilers

Hochspannungsteil

Die Toleranzen des Hochspannungsteils sind in der Versuchsanleitung [2] aufgelistet und werden vollständigkeitshalber hier nochmals in tabellarischer Form präsentiert (Tabelle 3):

Widerstände	Kondensatoren	Toleranz	Erweiterungsfaktor
$68\ \Omega$		$\pm 5\%$	$k = 2$
$270\ \Omega$		$\pm 5\%$	$k = 2$
$1100\ \Omega$		$\pm 5\%$	$k = 2$
$51\ M\Omega$		$\pm 1\%$	$k = 2$
	$4.2\ nF$	$\pm 5\%$	$k = 2$

Table 3: Hochspannungsteil: Widerstände und Kondensator mit dazugehörigen Toleranzen und Erweiterungsfaktoren

Niederspannungsteil Die Toleranzen des Niederspannungsteil sind in der Versuchsanleitung [2] aufgelistet und werden vollständigkeitshalber hier ebenfalls nochmals in tabellarischer Form präsentiert (Tabelle 4):

Widerstände	Kondensatoren	Toleranz	Erweiterungsfaktor
$2.15 - 1200\ \Omega$		$\pm 5\%$	$k = 2$
	$12 - 150\ nF$	$\pm 10\%$	$k = 2$

Table 4: Niederspannungsteil: Widerstände und Kondensatoren mit dazugehörigen Toleranzen und Erweiterungsfaktoren

1.4.2 Messunsicherheiten der Spannung

- Die Sprungspannung am Ausgang des Sprungspannungsgenerators (Typ HVL-018) wird mittels Taskkopf Keysight Typ N2862B und dem Oszilloskop (Agilent MSOX3014A (4-Kanal, 100 MHz, 2 GSa/s)) gemessen. In dieser Kombination erhalten wir eine Messunsicherheit von $\pm 3\%$ vom Teilverhältnis für die erweiterte Messunsicherheit ($k=2$). [1]
- Der Unsicherheit durch Quantisierung für 8 Bit vertikale Auflösung ist zu vernachlässigen. Denn diese ist wesentlich kleiner als $\pm 3\%$, daher überwiegt die oben beschriebene Unsicherheit massiv.
- Es existiert ein Fehler in der Bestimmung der Zeiten (Antwortzeit, Anstiegszeit, Abfallzeit, Einschwingzeit). Der Wert dieser Abschätzung ist abhängig welche Methode zur Auswertung der Daten gewählt wird. Hier wird eine graphische Methode gewählt, so wie sie in Kapitel 3.3 der Versuchsanleitung [2] benutzt wird.¹
- Die DC Spannungsquelle (GW Instek GPS-3303S) hat eine Messunsicherheit von weniger als $\pm 0.03\%$ ($k=2$). Die DC Spannungsquelle darf aus Schutzgründen für die Schaltung mit maximal +18 V Gleichspannung betrieben werden. Das ergibt einen Fehler von $\pm 6 \text{ mV}$. Selbst wenn also die Messunsicherheit $\pm 0.03\%$ beträgt, so wäre der Fehler immernoch vernachlässigbar klein. Die DC Spannungsquelle wird also als konstant angenommen.
- Die Werte der Bauteile (Widerstände, Kapazitäten) werden nur für die theoretischen Berechnungen verwendet. Daher spielen die in Kapitel 1.4.1 aufgelisteten Toleranzen für die Messunsicherheit bei Spannungsmessungen keine Rolle.

Aus diesen Unsicherheiten resultiert für den Massstabsfaktor $F = \frac{u_1}{u_2}$ zusammen mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz folgende Unsicherheit:

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\Delta u_1}{u_2}\right)^2 + \left(-\Delta u_2 \frac{u_1}{u_2^2}\right)^2} \quad (18)$$

¹Ohne Daten ist es schwer die Toleranz der graphischen Methode zu bestimmen. Daher verzichten wir bis zum Erhalt der Daten auf eine Schätzung.

1.5 Ergänzende Einführung

Korrektur Kapitel 1.4.1 bezieht sich auf die Bauteile aller Spannungsteiler, und nicht nur auf jene des Hochspannungsteilers und des Niederspannungsteilers.

Ergänzung

Grenzfrequenz berechnen mit Antwortzeit:

Mit den Formeln (10) und (11) kann f_{go} wie folgt berechnet werden (gültig für den hochohmigen, niederohmigen und den Zaengl Teiler):

$$f_{go} = \frac{1}{2\pi \cdot T_a} \quad (19)$$

Erdstreuukapazität des Hochohmschen Terilers:

Die Erdstreuukapazität des vereinfachten hochohmschen Teilers ist (vgl. Vorlesung [3]):

$$C_E = \frac{4T_a}{R_1} \quad (20)$$

Messunsicherheiten Ergänzung:

- Für die Grenzfrequenz (Gleichung 5) erhalten wir folgenden Fehler:

$$\Delta f_{go} = \sqrt{\left(-\frac{0.35}{T_a^2} \cdot \Delta T_a\right)^2} \quad (21)$$

- Für die Grenzfrequenz (Gleichung 19) erhalten wir folgenden Fehler:

$$\Delta f_{go} = \sqrt{\left(-\frac{1}{2\pi \cdot T^2} \cdot \Delta T_a\right)^2} \quad (22)$$

- Für die Grenzfrequenz (Gleichung 20) erhalten wir folgenden Fehler:

$$\Delta C_E = \sqrt{\left(\frac{4}{R_1} \cdot \Delta T_a\right)^2} \quad (23)$$

- Bei den theoretischen Berechnungen werden die Bauteile ebenfalls als ideal angenommen. Denn die theoretischen Werte, die hier berechnet werden, dienen dazu, diese mit den experimentellen Werten zu vergleichen. Da die experimentellen Werte bereits eine relativ hohe Ungenauigkeit aufweisen, ist es nicht notwendig, bei den theoretischen Werten ebenfalls eine Unsicherheitsanalyse zu vollziehen, weil diese eine im Verhältnis kleinere Ungenauigkeit aufweisen.

2 Messprotokoll

2.1 Verwendete Infrastruktur

2.1.1 Umgebungsbedingungen

Ort: ETZ C99

Datum: 23.04.2020

2.1.2 Verwendete Geräte

Oszilloskop	Agilent Tech. MSOX-X 3014A (4-Kanal, 100MHz, 4GSa/s)
Signalgenerator	Impedanz: $1M\Omega$ bei allen Messungen, wenn nichts spezifiziert Agilent 33120A (Sinus & Rechteck Waveform Generator, 10MHz) Bei allen Messungen gilt (wenn nichts anderes steht): Impedanz: High Impedance ($1 M\Omega$), Frequenz: 45Hz (Rechteck), Amplitude: $5 V_{pp}$, Offset: $2.5 V_{DC}$
Koaxialkabel	RG58 mit BNC Steckern (Länge: ca. 1m)
Tastkopf	Passiv Keysight N2862B, 150 MHz, 300 V
Sprungspannungsgenerator	Typ HVL-018 (Duty Cycle 50%, Offset $+2.5\ldots 2.7V$, Wellenform Rechteck, Output High Z Termination, Amplitude $5 V_{pp}$)
Labornetzteil (DC-Quelle)	GW Instek GPS-3303S (Output Rating: 0~30V, 0~6A) Output für diese Versuchsreihe: 18V
DC-Spannungsquelle	Ausgangsspannung 220V, Ausgangstrom 350mA, 75W
HVAC Transformator	Zur Erzeugung hoher Ausgangswechselspannungen
Kupferband	Zur Erdung von Sprungspannungsgenerator und Niederspannungsteil (gelb-grüne Farbe)
Bananenkabel	Anschluss Strom- und Spannungsversorgung, Erdung des Niederspannungsteils
Hochspannungsteil	Steckbrett (passend auf Teilerfuss, mit Messing-Steckermöglichkeiten für R- und C-Komponenten, Höhe: 90cm, Gesamtbreite Messing-Steckermöglichkeiten-Aussendurchmesser: 3.2cm)
Niederspannungsteil	Teilerfuss mit zentralem, koaxialem Abgriff für Messung (BNC-Abgriff mit integriertem Widerstand von 47.5Ω , Höhe: 11cm, Durchmesser: 24cm)
Dämpfungswiderstand	R_d (variabel 0 - $1k\Omega$)
Laborstativ	Für erhöhte Position des Sprungspannungsgenerators

2.2 Messaufbau

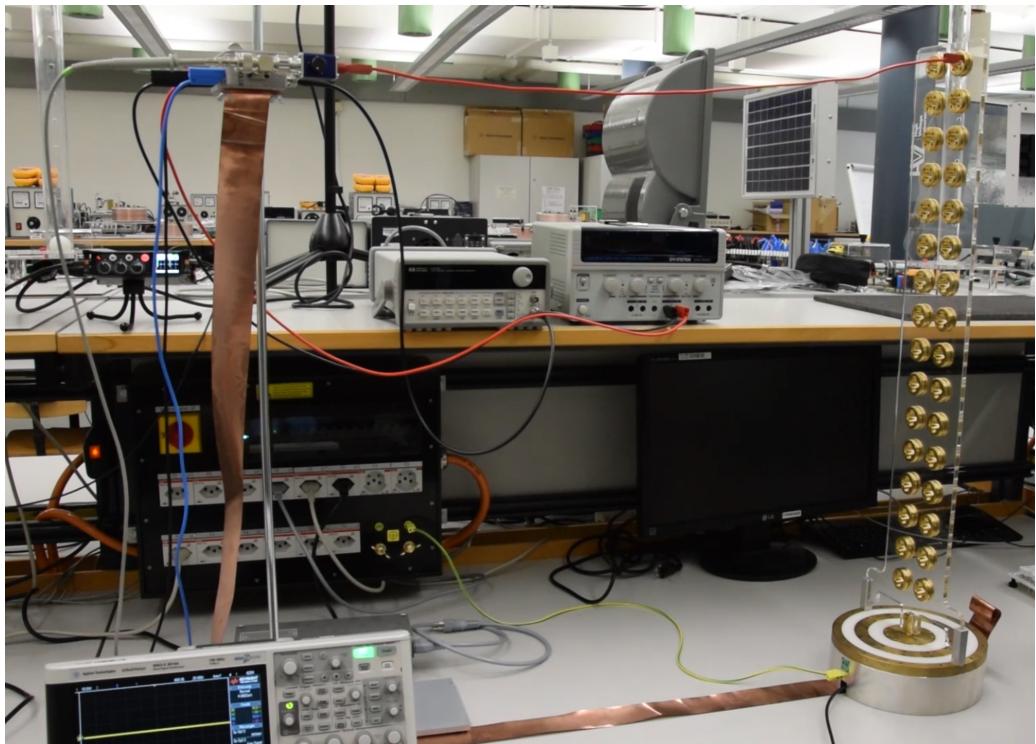


Figure 11: Allgemeiner Versuchsaufbau gem. Abb. 10 (Abstand Sprungspannungsbenerator zu Hochspannungsteil: 85cm)

Mit diesem Versuchsaufbau in Abb. 11 lassen sich alle in dieser Versuchsreihe behandelten Hochspannungsteilern untersuchen. Die Messdaten sind in den folgenden Abschnitten "Messergebnisse" zu entnehmen.

Dabei wird der Hochspannungsteil und der Niederspannungsteil gemäss den definierten Vorgaben (siehe Tabelle 2 und [2]) mit Bauteilen bestückt und anschliessend untersucht.



Figure 12: Verschiedene Steckmöglichkeiten der R- & C-Elemente. Rechts: Aufbau NS-Teil [2]

2.2.1 Messergebnisse: Rein ohmscher Teiler - hochohmig

- Hochspannungsteil Z_{HS} : $756 \text{ M}\Omega$ ($15 \times 51 \text{ M}\Omega$ in Serie)
- Niederspannungsteil Z_{NS} : $1 \text{ M}\Omega$ des Oszi. (Leerlauf)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	ns/dec	Oszi.-Bild
U_1	218.11V	34.874mV	100	50	10	13
U_2	286.80mV	921.13 μ V	100	50m	5000	13
T_a	3.329ms	31.751 μ s	100	50m	5000	14

Table 5: Messtablle: Rein ohmscher Teiler - hochohmig, (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

U_1 Spannungsamplitude am Ausgang Sprungspannungsgenerator (HS + NS-Teil, $R_d=0\Omega$)
 U_2 Spannungsamplitude NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
 T_a Abfallzeit

- Wenn eine Hand, einen Arm oder ein Erdungskabel in die Nähe des Teilers gehalten wird, dann vergrössert sich die Abfallzeit T_a und U_2 verkleinert sich. Die Schwingungen gemessen am NS-Teil werden ebenfalls beeinflusst, insbesondere stärkeres Überschwingen und weniger starke Dämpfung.
- Wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergrössert wird, dann nimmt das Schwingverhalten bzw. die Oszillationen am Anfang der Sprungspannung am NS-Teil ab. Dies ist allerdings nur im μs -Bereich erkennbar. Im ms-Bereich verändert sich nichts.
- Wenn der 47.5Ω -Serienabschluss des Messkabels durch einen Anschluss ohne eingebauten Widerstand ersetzt wird, verändert sich nichts. Im μs -Bereich ist erkennbar, dass wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergrössert wird, das Schwingverhalten bzw. die Oszillation abnimmt am Anfang der Sprungspannung am NS-Teil.

2.2.2 Messergebnisse: Rein ohmscher Teiler mit 16.5Ω - niederohmig

- Hochspannungsteil Z_{HS} : $16.5 \text{ k}\Omega$ ($15 \times 1100 \Omega$ in Serie)
- Niederspannungsteil Z_{NS} : 36Ω ($12 \times 432 \Omega$ in Parallel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	ns/dec	Oszi.-Bild
U_1	113.80V	0.0V	100	50	10	15
U_2	248.62mV	826.87uV	100	50m	5000	15
T_a	83.10ns	2.732ns	100	50m	100	16
$U_{1,50\Omega}$	119.00V	0.0V	100	50	150	17
$U_{2,50\Omega}$	88.00mV	1.881nV	100	50m	5000	17

Table 6: Messtabille: Rein ohmscher Teiler mit $16.5 \text{ k}\Omega$ - niederohmig, (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

U_1	Spannungsamplitude am Ausgang Sprungspannungsgenerator (HS + NS-Teil, $R_d=0\Omega$)
U_2	Spannungsamplitude über NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
T_a	Abfallzeit
$U_{1,50\Omega}$	Spannungsamplitude HS + NS-Teil mit 50Ω Eingangsimpedanz des DSOs ($R_d=0\Omega$)
$U_{2,50\Omega}$	Spannungsamplitude über NS-Teil mit 50Ω Eingangsimpedanz des DSOs ($R_d=0\Omega$)

- Wenn eine Hand, einen Arm oder ein Erdungskabel in die Nähe des Teilers gehalten wird, dann vergrössert sich die Abfallzeit T_a . Die Schwingungen gemessen am NS-Teil werden ebenfalls beeinflusst, insbesondere stärkeres Überschwingen und weniger starke Dämpfung.
- Wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergrössert wird, dann nimmt das Schwingverhalten bzw. Oszillationen am NS-Teil ab. Siehe DSO-Bild 18 im Anhang.
- Wenn der 47.5Ω -Serienabschluss des Messkabels durch einen Anschluss ohne eingebauten Widerstand ersetzt wird, verändert sich nichts.
- Wird die Eingangsimpedanz des DSOs angepasst auf 50Ω , so verkleinert sich U_2 deutlich.

2.2.3 Messergebnisse: Rein ohmscher Teiler mit $1.02 \text{ k}\Omega$ - niederohmig

- **Hochspannungsteil Z_{HS} :** $1.02 \text{ k}\Omega$ ($15 \times 68 \Omega$ in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS} :** 2.23Ω ($12 \times 26.7 \Omega$ in Parallel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	ns/dec	Oszi.-Bild
U_1	14.23V	82.266mV	100	5	50	19
U_2	28.998mV	202.00 μ V	100	5m	20	19
T_a	4.031ns	195.18ps	100	5m	20	19
$U_{1,R_d=1\text{k}\Omega}$	25.71V	43.809mV	100	5	50	20
$U_{2,R_d=1\text{k}\Omega}$	27.90mV	8.504pV	100	5m	5000	20

Table 7: Messtabille: Rein ohmscher Teiler mit $1.02 \text{ k}\Omega$ - niederohmig, 2.23Ω (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

U_1	Spannungsamplitude über HS + NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
U_2	Spannungsamplitude über NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
T_a	Abfallzeit
$U_{1,R_d=1\text{k}\Omega}$	Spannungsamplitude über HS + NS-Teil mit $R_d = 1\text{k}\Omega$
$U_{2,R_d=1\text{k}\Omega}$	Spannungsamplitude über NS-Teil mit $R_d = 1\text{k}\Omega$

- Wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergrössert wird, dann nimmt die Spannungsamplitude über (HS + NS)-Teil zu und die Spannungsamplitude am NS-Teil leicht ab. Siehe DSO-Bild 20 im Anhang.
- Leider wird im Video der Praktikumsdurchführung der 47.5Ω -Serienabschluss des Messkabels nicht angepasst und die Eingangsimpedanz des DSOs nicht auf 50Ω reduziert.

- **Hochspannungsteil** Z_{HS} : 1.02 k Ω (15 x 68 Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil** Z_{NS} : 2.15 Ω (2 x 4.32 Ω in Parallel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	ns/dec	Oszi.-Bild im Anhang
U_1	14.27V	77.054mV	100	5	150	21
U_2	29.147mV	98.892 μ V	100	5m	50	21
T_a	2.00ns	1.889fs	100	5m	50	21

Table 8: Messtablle: Rein ohmscher Teiler mit 1.02 k Ω - niederohmig, 2.15 Ω (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

- **Hochspannungsteil** Z_{HS} : 1.02 k Ω (15 x 68 Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil** Z_{NS} : 2.15 Ω (1 x 2.15 Ω Einzel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	ns/dec	Oszi.-Bild
U_1	14.232V	78.855mV	100	5	150	22
U_2	30.562mV	68.579 μ V	100	10m	50	22
T_a	2.00ns	640.77as	100	10m	50	22

Table 9: Messtablle: Rein ohmscher Teiler mit 1.02 k Ω - niederohmig, 2.15 Ω Einzel (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

- Werden die 12 Widerstandselemente am NS-Teil durch zwei schwarze Elemente ersetzt, dann kommt es zu einem starken Überschwingen am NS-Teil. Dies verstärkt sich, wenn die beiden schwarzen Elemente durch ein Element ersetzt werden.

2.2.4 Messergebnisse: Rein kapazitiver Teiler

- **Hochspannungsteil** Z_{HS} : 313 pF (15 x 4.7 nF in Serie)
- **Niederspannungsteil** Z_{NS} : 144 nF (12 x 12 nF in Parallel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	us/dec	Oszi.-Bild
U_1	215.00V	148.56mV	100	50	4	23
U_2	470.04mV	400.00 μ V	100	100m	1	23
T_a	2.00ns	324.55as	100	100m	1	23
$T_{a,optimal}$	54.68ns	241.21ps	100	100m	0.1	24

Table 10: Messtablle: Rein kapazitiver Teiler mit 313 pF, 144nF (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

- U_1 Spannungsamplitude über HS + NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
 U_2 Spannungsamplitude über NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
 T_a Abfallzeit
 $T_{a,optimal}$ optimale Abfallzeit mit möglichst wenig Überschwingen

- Wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergrössert wird, dann nimmt das Schwingverhalten bzw. Oszillationen am NS-Teil ab und die Abfallzeit T_a vergrössert sich.
- Optimal am NS-Teil wenn die Abfallzeit T_a möglichst klein ist mit einem möglichst kleinem Überschwingen. Dies kann mit mittels Anpassen des Dämpfungswiderstands R_d gefunden werden.
- Mit dem Dämpfungswiderstand R_d kann man die resonante Schwingung reduzieren. Die hochfrequente Störung am Anfang kann mit Hilfe der Funktion "Bandbreitenbegrenzung" am Oszilloskop reduziert werden. (Siehe im Anhang Oszi.-Bild 25)
- Der 47.5Ω -Serienabschluss des Messkabels wird nun durch einen Anschluss ohne eingebauten Widerstand ersetzt. Es kann aufgrund der Schwingungen nur dann eine Aussage bzgl. der Abfallzeit getroffen werden, wenn der Dämpfungswiderstands R_d so verändert wird, dass er das Schwingverhalten von vorhin wieder hervorruft. Die Bandbreitenbegrenzungsfunktion des Oszilloskops hilft hier nur gering bei der Berurteilung beim Schwingverhalten.
- **Hochspannungsteil Z_{HS} :** 313 pF (15 x 4.7 nF in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS} :** 150 nF (2 x 75 nF in Parallel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	us/dec	Oszi.-Bild
U_1	217.00V	0.0V	100	50	0.3	26
U_2	480.70mV	2.00mV	100	100m	0.2	26
$T_{a,optimal}$	55.735ns	23.463ns	100	100m	0.2	26

Table 11: Messtabllle: Rein kapazitiver Teiler mit 313 pF, 150nF (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

- **Hochspannungsteil Z_{HS} :** 313 pF (15 x 4.7 nF in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS} :** 150 nF (1 x 150 nF Einzel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	us/dec	Oszi.-Bild
U_1	217.00V	245.21nV	100	50	0.3	27
U_2	350.00mV	246.23aV	100	100m	0.5	27
$T_{a,optimal}$	23.045ns	9.017ns	100	100m	0.5	27

Table 12: Messtabllle: Rein kapazitiver Teiler mit 313 pF, 150nF Einzel (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

- Werden die 12 Kondensatorelemente am NS-Teil durch zwei schwarze Elemente ersetzt, dann kommt es zu einem starken Überschwingen am NS-Teil (siehe Anhang DSO-Bild 26). Dasselbe ist zu erkennen, wenn die beiden schwarzen Elemente durch ein Element ersetzt werden. Zudem gilt für beide Einstellungen, dass die Optimierung mittels Dämpfungswiderstand R_d im ms-Bereich eine Andere ist als im μ s-Bereich, sprich es braucht eine andere R_d -Einstellung im jeweiligen Bereich. D.h. bei Veränderung der Einstellung des Oszilloskops verändert sich das Optimum. Dies bedeutet, dass es nur ein vermeintliches Optimum war in der Darstellung des Dämpfungswiderstandes.

2.2.5 Messergebnisse: Gedämpft kapazitiver Teiler - (Zaengl-Teiler)

- **Hochspannungsteil Z_{HS} :** 313 pF (15 x 4.7 pF in Serie) und 1.02 kΩ (15 x 68 Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS} :** 144 nF (12 x 12 nF in Parallel) und 2.23 Ω (12 x 26.7 Ω in Parallel)

Messung	Mittelwert	Stand.-Abw.	Zählwert	V/dec	us/dec	Oszi.-Bild
U_1	217.00V	0.0V	100	0.150	0.3	28
U_2	507.00mV	0.0V	100	100m	5000	28
$T_{a,optimal,1}$	5.435ns	183.33ps	100	100m	0.05	29
$T_{a,optimal,2}$	5.785ns	248.78ps	100	100m	0.05	30

Table 13: Messtablle: Rein kapazitiver Teiler mit 313 pF, 150nF Einzel (DC-Kopplung, Tastkopf 1:1)

- U_1 Spannungsamplitude über HS + NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
 U_2 Spannungsamplitude über NS-Teil ($R_d=0\Omega$)
 $T_{a,optimal,1}$ optimale Abfallzeit mit möglichst wenig Überschwingen mit Entfernen eines Widerstandes am NS-Teil
 $T_{a,optimal,2}$ optimale Abfallzeit mit möglichst wenig Überschwingen mit Entfernen zweier Widerstände am NS-Teil und Optimierung mittels R_d

- Die Sprungantwort bzw. die Abfallzeit T_a verschlechtert sich nur, wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergössert wird. Allerdings kann sie verbessert werden, wenn ein einzelner oder zwei Widerstände am NS-Teil entfernt werden und die Überkompensation bzw. das leichte Überschwingen mittels R_d korrigiert wird. Wobei darauf geachtet werden muss, dass der Verlauf auch für grössere Zeiten korrekt ist.
- Wenn der 47.5 Ω-Serienabschluss entfernt wird, verändert sich das Übersetzungsverhältnis nicht. Es treten grössere Schwingungen auf bei der Sprungantwort. Die Amplitude dieser Schwingungen kann mittels Erhöhen des Dämpfungswiderstandes R_d reduziert werden. Wenn R_d maximal gewählt wird, ist in Oszi.-Bild 31 im Anhang ersichtlich, dass die Sprungantwort nicht besser wird, sondern eher schlechter.

3 Messunsicherheiten

- Die Messunsicherheiten und Toleranzen der Bauteile sind in 1.4 detailliert behandelt.
- Weiterhin gilt anzumerken, dass der Output des Signalgenerators als unsicherheitsfrei angenommen wird. Desweiteren werden Messunsicherheiten, welche durch die Kabel (Bananenkabel, Koaxialkabel) und dem Kupferband versursacht werden, vernachlässigt. Die Nichtidealitäten dieser Bauteile sind im Vergleich zu den Toleranzen der Spannungsmessung mit dem Tastkopf, Oszilloskop und dem Fehler zum Ablesen der Zeiten vernachlässigbar klein.
- Der Hergang zur graphischen Auswertung: Ein Scope wird in Adobe Illustrator geladen und dort mit einem digitalen Pixel-Massstab die Anzahl Pixel für den gewünschten Wert abgelesen. Um die effektiven Werte zu erhalten, wurde die Pixelanzahl für eine Dekade mit der Anzahl Pixel des Wertes in Relation gesetzt. Dadurch erhält man zusätzlich eine vernachlässigbar kleine Ungenauigkeit im Vergleich zu der Ungenauigkeiten des Oszilloskops oder der Sonden. Die Schwierigkeit liegt oft daran, das korrekte Pixel zur Messung auszuwählen. Daher Schätzen wir den graphischen Fehler in horizontaler Richtung auf $\pm 3\%$. In vertikaler Richtung ist die Pixelauswahl (in den wenigen Fällen wo uns diese überhaupt in der graphischen Auswertung interessiert) mehr oder weniger klar, daher überwiegt hier der Messfehler einer Spannungsmessung (die $\pm 3\%$ wie bereits besprochen).
- Um Redundanz zu vermeiden, haben wir die in Kapitel 1.4 aufgelisteten Messunsicherheiten gerade in den Ergebnissen hinzugefügt. Die Werte, deren Messunsicherheiten oder Fehlerfortpflanzung nach Formel 18 oder 22 berücksichtigt werden, haben also die in Kapitel 1.4 bestimmten Toleranzen.
- Im Messprotokoll ist ersichtlich, dass bei Spannungsmessungen die $\pm 3\%$ Messunsicherheit des Spannungsmesswertes gemessen mit dem Oszilloskop und Tastkopf (vgl. Kapitel 1.4.2) die Standartunsicherheit der Mittelung mehrerer gemessener Daten stark überwiegt. Die Standartunsicherheit ist folglich vernachlässigbar klein. Die Toleranzangaben der Spannungsmessungen im Ergebnisblatt (4) sind somit eben diese $\pm 3\%$.
- Aufgrund der hohen horizontalen Auflösung des Oszilloskop, lässt sich die Bitauflösung vernachlässigen. Die Standartabweichung durch Mittelung der Messgrößen variiert je nach Messung für die Zeitmessungen T_a stark. Wo immer möglich, sind die Toleranzangaben der Konvention - wie sie in der Vorlesung Mess- und Versuchstechnik behandelt wurde - entsprechend. In einigen Fällen ist die Standartabweichung um mehr als 3 Zehnerpotenzen kleiner als der gemessene Mittelwert (z.B. Bei den Messergebnissen für den Rein ohmschen Teiler mit $1.02 \text{ k}\Omega$ haben wir für den dritten Versuchsaufbau $T_a = 2.00\text{ns}$ mit einer Standartabweichung von 640.77as). In solchen Fällen wird das Ergebnis als ohne Messunsicherheit angegeben, da die Standartunsicherheit (und die horizontale Auflösung) vernachlässigbar klein ist.

4 Ergebnis

Variable	Bedeutung
C_E	Erdkastreukapazität der vereinfachten Schaltung
C_e	Erdkapazität
T_t	Antwortzeit (Theoretisch)
T_e	Antwortzeit (experimentell)
T_a	Anstiegszeit/Abfallzeit
t_E	Einschwingzeit
f_{g0}	Grenzfrequenz
β	Überschiessen
F_t	Übersetzungsverhältnis/Massstabsfaktor (theoretisch)
F_e	Übersetzungsverhältnis/Massstabsfaktor (experimentell)

Table 14: Variablen und ihre Bedeutung

Gemäss der Versuchsanleitung Lab 4 [2] hat das Hochspannungsteil ein ca. 90 cm ($l = 0.90m$) hohes Steckbrett zur Aufnahme der 15 in Serie zu schaltenden Steckkomponenten. In Tabelle 1 ist ersichtlich, dass bei jeder Versuchsanordnung stets alle 15 Plätze belegt werden. Die Knotenpunkte haben einen Aussendurchmesser von 32 mm ($d = 0.032m$). Mit Formel 1 ergibt dies schliesslich für die Erdkapazität:

$$C_e = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{l}{d}\right)} = 1.43 \cdot 10^{-11} \text{F} = 14.4 \text{pF} \quad (24)$$

Wobei zwei signifikante Stellen für die Kapazität gewählt wurden, da die Höhe (l) ebenfalls mit zwei signifikanten Stellen in der Einheit Meter angegeben ist.

Gewisse Werte wurden graphisch aus den Oszilloskopbildern berechnet. Der Hergang dabei war, dass ein Scope in Adobe Illustrator geladen wurde und dort mit einem digitalen Pixel-Massstab die Anzahl Pixel für den gewünschten Wert abgelesen wurden. Um die effektiven Werte zu erhalten, wurde die Pixelanzahl für eine Dekade mit der Anzahl Pixel des Wertes in Relation gesetzt. Dadurch erhält man zusätzlich eine vernachlässigbar kleine Ungenauigkeit im Vergleich zu der Ungenauigkeiten des Oszilloskops oder der Sonden.

4.1 Rein ohmscher Teiler - hochohmig

- **Hochspannungsteil** $Z_{HS} : R_1 = 756 \text{ M}\Omega$ (15 x 51 M Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil** $Z_{NS} : R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ des Oszi. (Leerlauf)
- $U_1 = (218 \pm 7)\text{V}$

- $U_2 = (286 \pm 9)\text{mV}$
- $T_a = (3.329 \pm 0.032)\text{ms}$

Der theoretische Masstabsfaktor (Notation t) berechnet sich aus Formel (8), wobei zu beachten ist, dass $R_d \ll R_1$ im hochohmischen Bereich und wir dadurch R_d hier vernachlässigen. Das selbe gilt für allfällige Serienabschlüsse R_S des Messkabels:

$$F_t = \frac{R_d + R_1 + R_2 + R_S}{R_2 + R_S} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{756\text{M}\Omega + 1\text{M}\Omega}{1\text{M}\Omega} = 757$$

Man kann allerdings im μs Bereich feststellen, dass die Schwingung an den Flanken deutlich reduziert wurden mit hohen R_d oder R_S . Wobei sich R_S mehr auf die Schwankung ausübt, da er zusätzlich im Nenner auftritt.

Ebenso der experimentelle Wert (Notation e) des Masstabfaktors mit Formel (8):

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (762 \pm 35)$$

Mit Formel (19): $f_{go} = \frac{1}{2\pi \cdot T} = (106.1 \pm 3.5)\text{kHz}$

Mit Formel (5): $f_{go}(-3\text{dB}) = \frac{0.35}{T_a} = (105 \pm 2)\text{kHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{R_1 C_e}{6} = 1.81\text{ms}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

Mit Formel (11): $T_e = (1.50 \pm 0.05)\text{ms}$

$$t_E = (38.6 \pm 1.2)\text{ns}$$

$$\beta = (6.68 \pm 0.2)\text{mV}$$

$$C_E = 4 \cdot T_e / R_1 = 7.94\text{pF}$$

der Fehler ist hier vernachlässigbar klein, vgl. Formel 23

4.2 Ohmscher Teiler mit $16.5\text{k}\Omega$ - niederohmig

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $R_1 = 16.5 \text{ k}\Omega$ (15 x 1100Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $R_2 = 36 \Omega$ (12 x 432Ω in Parallel)
- $U_1 = (113.8 \pm 3.5)\text{V}$
- $U_2 = (248 \pm 8)\text{mV}$
- $U_{1,DSO=50\Omega} = (119.0 \pm 3.6)\text{V}$
- $U_{2,DSO=50\Omega} = (88.0 \pm 2.7)\text{mV}$
- $T_a = (83.1 \pm 2.7)\text{ns}$

Ohne den Widerstand des Serienabschlusses R_S wird der Masstabfaktor:

$$F_t = 487.11$$

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (458 \pm 21)$$

Falls wir jedoch die Eingangsimpedanz des Oszilloskopes von $1 \text{ M}\Omega$ auf 50Ω stellen, verändert sich die Spannung des NS-Teiles markant und somit auch der Masstabfaktor:

$$F_{e, DSO=50\Omega} = \frac{U_{1,50\Omega}}{U_{2,50\Omega}} = (1352 \pm 59)$$

Mit Formel (19): $f_{go} = (4.24 \pm 0.14) \text{ MHz}$

Mit Formel (5): $f_{go} = (4.21 \pm 0.14) \text{ MHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{R_1 C_e}{6} = 39.6 \text{ ns}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$$T_e = (37.5 \pm 1.2) \text{ ns}$$

$$t_E = (158 \pm 5) \text{ ns}$$

Es entstand keine Überschwingung, somit ist $\beta = 0 \text{ mV}$

$$C_E = 4 \cdot T_e / R_1 = 9.37 \mu\text{F}$$

der Fehler ist hier vernachlässigbar klein, vgl. Formel 23

4.3 Ohmscher Teiler mit $1.02 \text{ k}\Omega$ - niederohmig

4.3.1 Aufbau 1

- Hochspannungsteil $Z_{HS} : R_1 = 1.02 \text{ k}\Omega$ (15 x 68Ω in Serie)
- Niederspannungsteil $Z_{NS} : R_2 = 2.23 \Omega$ (12 x 26.7Ω in Parallel)
- $U_1 = (14.23 \pm 0.5) \text{ V}$
- $U_2 = (29.0 \pm 0.9) \text{ mV}$
- $U_{1,R_d=1\text{k}\Omega} = (25.7 \pm 0.8) \text{ V}$
- $U_{2,R_d=1\text{k}\Omega} = (27.9 \pm 0.9) \text{ mV}$
- $T_a = (4.03 \pm 0.19) \text{ ns}$

Hier starten wir ohne ein R_d und R_S . $F_{t,R_d=0\Omega} = \frac{R_1+R_2}{R_2} = 458.40$

Und daraufhin mit maximalem R_d ohne R_S . $F_{t,R_d=1\text{k}\Omega} = \frac{R_d+R_1+R_2}{R_2} = 906.83$

$$F_{e,R_d=0\Omega} = \frac{U_1}{U_2} = (490 \pm 24)$$

$$F_{e,R_d=1\text{k}\Omega} = \frac{U_{1,R_d=1\text{k}\Omega}}{U_{2,R_d=1\text{k}\Omega}} = (921 \pm 42)$$

Mit Formel (19): $f_{go} = (106.1 \pm 3.5)\text{kHz}$

Mit Formel (5): $f_{go} = (86.8 \pm 4.2)\text{MHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{R_1 C_e}{6} = 2.45\text{ns}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$T_e = (1.73 \pm 0.05)\text{ns}$

$t_E = (210 \pm 6.3)\text{ns}$

$\beta = (9.38 \pm 0.3)\text{mV}$

4.3.2 Aufbau 2

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $R_1 = 1.02 \text{ k}\Omega$ (15 x 68 Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $R_2 = 2.15 \Omega$ (2 x 4.32 Ω in Parallel)
- $U_1 = (14.27 \pm 0.5)\text{V}$
- $U_2 = (29.2 \pm 0.9)\text{mV}$
- $T_a = 2.00\text{ns}$

Für den zweiten Aufbau wird der Schlusswiderstand ebenfalls ausgebaut. $F_{t,R_d=0\Omega} = \frac{R_1+R_2}{R_2} = 475$

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (488 \pm 22)$$

Mit Formel (5): $f_{go} = (175 \pm 6)\text{MHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{R_1 C_e}{6} = (2.45 \pm 0.08)\text{ns}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$t_E = (210 \pm 7)\text{ns}$

$\beta \geq 9.38\text{mV}$

Bei der graphischen Auslesung schiesst der Spannungswert unter die Bildgrenze hinaus, was es uns unmöglich macht einen genauen Wert für β anzugeben.

4.3.3 Aufbau 3

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $R_1 = 1.02 \text{ k}\Omega$ (15 x 68 Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $R_2 = 2.15 \Omega$ (1 x 2.15 Ω Einzel)
- $U_1 = (14.2 \pm 0.5)\text{V}$

- $U_2 = (30.6 \pm 0.9)\text{mV}$
- $T_a = 2.00\text{ns}$

Aufbau 2 und 3 unterscheiden sich nur in der Anordnung des NS-Teiles. Somit werden hier nur die experimentellen Werte aufgeführt.

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (464 \pm 22)$$

Mit Formel (5): $f_{go} = (175 \pm 6)\text{MHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{R_1 C_e}{6} = 2.45\text{ns}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$$t_E = (222.5 \pm 6.7)\text{ns}$$

$$\beta \geq (18.75 \pm 0.57)\text{mV}$$

Bei der graphischen Auslesung schiesst der Spannungswert unter die Bildgrenze hinaus, was es uns unmöglich macht einen genauen Wert für β anzugeben.

4.4 Rein kapazitiver Teiler

Für den kapazitiven Teiler muss auch die parasitäre Kapazität des Kabels in Betracht gezogen werden. Dieser lässt sich wie folgt berechnen:

$$C_K = l \cdot C'_K \quad (25)$$

Dabei nehmen wir nun an, dass das Kabel 5m lang ist und eine durchschnittliche Kabelkapazität von $C'_K = 100\text{pF/m}$ besitzt. Somit ist $C_K = 500\text{pF}$.

4.4.1 Aufbau 1

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $C_1 = 313 \text{ pF}$ (15 x 4.7 pF in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $C_2 = 144 \text{ nF}$ (12 x 12 nF in Parallel)
- $U_1 = (215 \pm 7)\text{V}$
- $U_2 = (470 \pm 15)\text{mV}$
- $T_a = 2.00\text{ns}$

$$F_t = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} = 462.7$$

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (457 \pm 21)$$

Mit Formel (5): $f_{go} = 175\text{MHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{Z_1 C_e}{6} = 7.66\text{ms}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$$T_e = (25 \pm 1)\text{ns}$$

$$t_E = (150 \pm 5)\text{ns}$$

$$\beta = (87.5 \pm 2.7)\text{mV}$$

4.4.2 Aufbau 2

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $C_1 = 313\text{ pF}$ (15 x 4.7 pF in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $C_2 = \text{nF}$ (2 x 75 nF in Parallel)
- $U_1 = (217 \pm 7)\text{V}$
- $U_2 = (480 \pm 8)\text{mV}$
- $T_a = (55 \pm 23)\text{ns}$

$$F_t = \frac{C_1 + C_2 + C_K}{C_1} = 481.8$$

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (452 \pm 17)$$

Mit Formel (5): $f_{go} = (6.4 \pm 2.7)\text{MHz}$

Mit Formel (11): $T_t = \frac{Z_1 C_e}{6} = 7.66\text{ms}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$$t_E = (280 \pm 8.4)\text{ns}$$

$$\beta \geq 150\text{mV}$$

Bei der graphischen Auslesung schiesst der Spannungswert unter die Bildgrenze hinaus, was es uns unmöglich macht, einen genauen Wert für β anzugeben.

4.4.3 Aufbau 3

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $C_1 = 313\text{ pF}$ (15 x 4.7 pF in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $C_2 = 150\text{ nF}$ (1 x 150 nF Einzel)
- $U_1 = (217 \pm 7)\text{V}$
- $U_2 = (350 \pm 11)\text{mV}$

- $T_a = (23 \pm 10)\text{ns}$

Aufbau 2 und 3 unterscheiden sich nur in der Anordnung des NS-Teiles. Somit werden hier nur die experimentellen Werte aufgeführt.

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (620 \pm 28)$$

Mit Formel (5): $f_{go} = (15 \pm 7)\text{MHz}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$$t_E = (375 \pm 12)\text{ns}$$

$$\beta \geq (273 \pm 9)\text{mV}$$

Bei der graphischen Auslesung schiesst der Spannungswert unter die Bildgrenze, hinaus was es uns unmöglich macht, einen genauen Wert für β anzugeben.

4.5 Zaengl-Teiler

- **Hochspannungsteil Z_{HS}** : $C_1 = 313 \text{ pF}$ (15 x 4.7 pF in Serie) und $R_1 = 1.02 \text{ k}\Omega$ (15 x 68 Ω in Serie)
- **Niederspannungsteil Z_{NS}** : $C_2 = 144 \text{ nF}$ (12 x 12 nF in Parallel) und $R_2 = 2.23 \Omega$ (12 x 26.7 Ω in Parallel)
- $U_1 = (217 \pm 7)\text{V}$
- $U_2 = (507 \pm 16)\text{mV}$
- $T_{a,optimal,1} = (5.44 \pm 0.19)\text{ns}$
- $T_{a,optimal,2} = (5.79 \pm 0.25)\text{ns}$

Das Übertragungsverhältniss des gedämpft kapazitiven Teilers lässt sich wie folgt berechnen:

$$F_t = \frac{R_d + R_1 + R_2}{R_2} = \frac{200\Omega + 2.67\Omega + 1.02k\Omega}{2.67\Omega} = 457.93$$

Oder nach dem Ausgleichskriterium:

$$F_t = \frac{C_K + C_1 + C_2}{C_2} = 462.66$$

Die beiden Massstabsfaktoren passen nicht perfekt aufeinander. Dies bedeutet, dass wir nicht den optimalen Wert für R_d gefunden haben und können so die Reflexion noch nicht perfekt kompensieren. Der experimentell gemessene Wert ist etwas kleiner mit:

$$F_e = \frac{U_1}{U_2} = (428 \pm 14)$$

Mit Formel (19): $f_{go} = (58 \pm 2)\text{kHz}$

Mit Formel (5): $f_{go} = (60 \pm 2)\text{MHz}$ Wobei hier die zweite "optimale" Antwortzeit von den beiden gewählt wurde, da man damit weniger Schwingungen erzeugt hat (der Unterschied beträgt 0.35ns).

Mit Formel (11): $T_t = \frac{Z_1 C_e}{6} = 7.66\text{ms}$

Die folgenden Werte wurden dabei Graphisch ausgelesen:

$$T_e = (2.73 \pm 0.09)\text{ns}$$

$$t_E = (78 \pm 3)\text{ns}$$

$$\beta = (119 \pm 4)\text{mV}$$

4.6 Zusammenfassung Ergebnisse

Teiler	Aufbau	Antwortzeit T_a	Bandbreite f_{go}
Rein ohmscher Teiler - hochohmig		$(3.329 \pm 0.032)\text{ms}$	$(105 \pm 2)\text{kHz}$
ohmscher Teiler mit $16.5\text{k}\Omega$ - neiderohmig		$(83.1 \pm 2.7)\text{ns}$	$(4.21 \pm 0.14)\text{MHz}$
Ohmscher Teiler mit $1.02\text{k}\Omega$ - niederohmig	1 2 3	$(4.03 \pm 0.19)\text{ns}$ 2.00ns 2.00ns	$(86.8 \pm 4.2)\text{MHz}$ 175MHz 175MHz
Rein kapazitiver Teiler	1 2 3	2.00ns $(5 \pm 23)\text{ns}$ $(23.1 \pm 10)\text{ns}$	175MHz $(6.4 \pm 2.7)\text{MHz}$ $(15 \pm 7)\text{MHz}$
Zaengl Teiler		$(5.44 \pm 0.19)\text{ns}$	$(4.21 \pm 0.14)\text{MHz}$

Table 15: Antwortzeiten und Grenzfrequenzen der verschiedenen Teiler

Teiler	Aufbau	Dämpfungswiderstand /Kabelkapazität R_d / C_K	theoret. Masstabsfaktor F_t	experim. Masstabsfaktor F_e
Rein ohmscher Teiler - hochohmig		vernachlässigbar	757	(762 ± 35)
ohmscher Teiler mit 16.5kΩ - niederohmig		1kΩ	487	(458 ± 21)
Ohmscher Teiler mit 1.02kΩ - niederohmig	1.1	0 Ω	458	(490 ± 24)
	1.2	1 kΩ	907	(921 ± 42)
	2	0 Ω	475	(488 ± 22)
	3	0 Ω	475	(464 ± 22)
Rein kapazitiver Teiler	1	500 pF	463	(457 ± 21)
	2	500 pF	481	(452 ± 17)
	3	500 pF	481	(620 ± 28)
Zaengl Teiler		200 Ω	458	(428 ± 14)
		500 pF	463	(428 ± 14)

Table 16: Massstabsfaktoren der verschiedenen Teiler

5 Diskussion

5.1 Ergebnisse

Allen Teilern gelingt es, die Spannung mittels eines Übersetzungsverhältnisses auf ein tieferes messbares Niveau zu bringen. Weiterhin ist aus Tabelle 16 ersichtlich, dass das Abgleichskriterium aus der Vorlesung für alle untersuchten Teilern gültig ist, da die theoretischen und experimentellen Werte für den Massstabsfaktor im jeweiligen Toleranzbereich liegen.

Die verschiedenen Teiler weisen allerdings verschiedene Merkmale auf, die wir im folgenden diskutieren werden.

5.1.1 Rein ohmscher Teiler - hochohmig

Als erstes gibt es hier zu bemerken, dass der Dämpfungswiderstand R_d einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf den Massstabsfaktor hat (da $R_d \ll R_1$). Mit der gleichen Argumentation sieht man auch, dass der Serienabschluss ebenfalls keinen Einfluss auf den Massstabsfaktor hat. Da Widerstände zu keinerlei zeitlichen Veränderungen im Spannungsverlauf führen, beeinflussen diese beiden Widerstände die Zeiten nicht.

Wie in Tabelle 16 ersichtlich ist, sind der theoretische und der experimentelle Massstabsfaktor sehr ähnlich, der Unterschied befindet sich im Rahmen der Messtoleranz.

Der Teiler hat eine Grenzfrequenz von $(106.1 \pm 3.5\text{Hz})$. Dadurch ist der Teiler für niederfrequente Wechselströme, wie beispielsweise einer Netzspannung von 50Hz, geeignet. Im Vergleich zu den anderen Teilern (vgl. Tabelle 15) ist die Antwortzeit allerdings langsam, folglich ist auch die Grenzfrequenz in Relation zu den anderen Teilern tief. Für eine Verwendung als Blitzstoss- und Stossspannungsmessteiler ist dieser Teiler somit am wenigsten geeignet. Weiterhin interessant ist, dass wegen den hohen Widerständen keine grossen Ströme durch den Teiler fliessen, dadurch ist der Teiler für Messungen über längere Zeitspannen geeignet. Der Teiler eignet sich also auch für Gleichspannungsmessungen. Wie in der Abbildung 14 ersichtlich, gleicht der Spannungsabfall einer Exponentialfunktion. Dies ist auch ersichtlich, dass beide Grenzfrequenzberechnungen (Grenzfrequenzberechnung im Falle einer Exponentialfunktion und die herkömmliche Berechnung wie sie in der Ergänzenden Einführung zu finden ist) in Kapitel 4.1 auf sehr ähnliche Werte kommen. Tatsächlich sind die beiden Werte sogar innerhalb ihrer gegenseitigen Toleranzen.

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

Der berechnete Wert für die Erdstreuukapazität C_e in Kapitel 4 unterscheidet sich zu jenem explizit berechnetem Wert für den rein hochohmischen 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.

5.1.2 Ohmscher Teiler mit $16.5\text{k}\Omega$

Auch bei diesem Teiler sind der theoretische und experimentelle Wert ähnlich. Aber der theoretische Wert liegt knapp nicht mehr im Toleranzintervall des experimentellen Massstabsfaktors. Hier könnten Nichtidealitäten der Bauteile die Ursache dieser kleinen Abweichung sein. Da der

theoretische Wert nur um 7 ausserhalb des Toleranzintervall ist, beziehungsweise das Toleranzintervall nur um ca. 16.67 % erweitert werden müsste, und unter Berücksichtigung der vielen Vereinfachungen (nicht idealität der Bauteile, kein Strom durch Oszilloskop, etc.) interpretieren wir diesen Wert immernoch als vernünftig.

Wenn der Dämpfungswiderstand R_d verkleinert wird, so nimmt das Schwingverhalten, bzw. die Oszillationen am NS-Teil zu. Um folglich Messungen zu verbessern, ist eine Vergrösserung von R_d in Betracht zu ziehen.

Bei diesem Teiler erkennt man, dass die Erdstreuukapazität wesentlich höher ist, als jene des hochohmschen Teilers.

Da wir hier einen niederohmigen Spannungsteiler haben, fliessen im Einsatz starke Ströme. Daher eignet sich dieser Teiler nicht für einen Einsatz in langen Zeiträumen. Wegen der grossen Bandbreite (im MHz Bereich) eignet sich dieser Teiler allerdings besser für Blitz- und Stosspannungsmessungen. Die Bandbreite ist viel grösser als jene des hochohmigen Teilers.

Der Spannungsabfall ist wie in Abbildung 16 klar ersichtlich exponential abnehmen. Dieser Umstand wiederspiegelt sich auch darin, dass die Grenzfrequenzberechnungen nach Gleichung 5 und 19 beinahe auf das selbe Resultat kommen. Beide Ergebnisse sind innerhalb des jeweilig anderen Toleranzbereichs.

5.1.3 Ohmscher Teiler mit $1.02\text{k}\Omega$

Wenn der Dämpfungswiderstand R_d vergrössert wird, dann nimmt die Spannungsamplitude über (HS + NS)-Teil zu und die Spannungsamplitude über NS-Teil leicht ab. Zudem bewirkt ein kleiner HS-Widerstand im Verhältnis zum vorherigen Teiler mit $16.5\text{k}\Omega$ eine höhere Ausgangsspannung. Leider wird im Video der Praktikumsdurchführung der 47.5Ω -Serienabschluss des Messkabels nicht angepasst und die Eingangsimpedanz des DSOs nicht auf 50Ω reduziert. Somit kann nur vermutet werden, dass die Veränderung des Serienabschlusses keinen grossen Einfluss hat auf den Spannungsverlauf.

Der experimentell bestimmte Werte des Massstabsfaktors ohne Dämpfungswiderstand R_d ist höher als der berechnete, theoretische Wert. Dies verändert sich wenn R_d erhöht wird, dann sind der berechnete und experimentell bestimmte Massstabfaktor sehr ähnlich, der Unterschied befindet sich im Rahmen der Messtoleranz. Weil im Video nur zwei Werte für R_d gezeigt wurden, ist ein höherer R_d -Wert sinnvoller als ein Kleiner bezüglich des Massstabsfaktors.

Werden die 12 Widerstandselemente am NS-Teil durch zwei schwarze Elemente ersetzt, dann kommt es zu einem starken Überschwingen am NS-Teil. Dies verstärkt sich, wenn die beiden schwarzen Elemente durch ein Element ersetzt werden. Beim Ersetzen dieser Widerstandselementen verringern sich die Massstabfaktoren, gut ersichtlich in Tabelle 16.

Die Grenzfrequenz ist gemäss der Tabelle 15 gegenüber den bisher behandelten Teilern deutlich gestiegen. Zudem ist die Antwortzeit gesunken und sehr schnell geworden. Somit ist dieser Ohmsche Teiler geeignet für Blitz- und Stosspannungsmessungen.

Um die hohe Bandbreite des NS-Teilers zu nutzen aber die starken Überschwingungen des NS-Teilers zu reduzieren, kann man diesen nun mit Kapazitäten am HS-Teil kombinieren. Somit werden die Nachteile reduziert.

5.1.4 Rein kapazitiver Teiler

Beim kapazitiven Teiler kann man einen grossen Einfluss des Dämpfungswiderstandes R_d feststellen, da durch das Entfernen von R_d grosse Oszillationen am Ausgang entstehen, ausgelöst

durch das Laden und Entladen der Kondensatoren. Bedingt durch diese Oszillationen ist der Teiler vergleichsmässig sehr langsam, mit einer langen Antwortzeit T_a , und somit nur für tiefe Frequenzen zu gebrauchen, falls kein R_d verbaut ist. Mit R_d wird die Oszillation gut gedämpft, der Teiler bekommt eine schnellere Antwortzeit T_a und ist damit für höhere Frequenzen einsetzbar.

Leider konnte nur für Aufbau 1 das Überschiessen sinnvoll ermittelt werden. Da bei Aufbau 2 und Aufbau 3 die Gemessenen Spannungen über die eingestellten Messgrenzen des Oszilloskops unterspringt. Daraus resultiert, dass - wie z.B. bei Abbildung 27 ersichtlich - die Spannungen abgekappt werden und den graphisch maximalen Wert annehmen. Das lässt sich folglich nicht sinnvoll ermitteln.

Um die Auswirkungen der Symmetrie vom Aufbau des NS-Teils hochspannungsseitig zu korrigieren, könnte man den Dämpfungswiderstand erhöhen. Dadurch werden starke Oszillationen verringert.

5.1.5 Zaengl Teiler

Wenn man den Zaengl Teiler mit den rein kapazitiven und $1\text{k}\Omega$ -Teiler vergleicht, fällt auf, dass die Grenzfrequenz und dementsprechend die Bandbreite beim Zaengl-Teiler gleich oder höher ist. Dieses Verhalten kann sich verändern, wenn der Dämpfungswiderstand R_d angepasst wird. Ein Vergleich ist hier nicht möglich, weil die R_d im Laborvideo nicht beschrieben werden. Dennoch lässt sich festhalten, dass der gedämpfte Zaengl-Teiler - nach einer Optimierung mit Entfernen von einem oder zwei Widerständen und R_d - kaum Überschwingungen der Sprungantwort aufzeigt und dementsprechend sehr stabil ist im Vergleich zu den anderen Teilern. Und aus diesem Grund eignet sich der Zaengl-Teiler für hohe und rasch veränderliche Spannungen, also Stoss-, Blitzstoss-, und Wechselspannungen.

5.2 Messunsicherheiten

Es fällt auf, dass die Standartunsicherheiten der gemessenen Daten teilweise stark in ihrer Dimension relativ zum Mittelwert variieren. So befindet sich beispielsweise der Mittelwert für T_a in Tabelle 10 im nanosekunden Bereich und die Standartabweichung im attosekunden Bereich. Es stellt sich die Frage, ob das Oszilloskop überhaupt in der Lage ist, im attosekunden Bereich zu messen und ob somit eine solche Angabe überhaupt sinnvoll. Da in diesen Fällen die Toleranzangabe sowieso vernachlässigbar klein ist, erübrigt es sich allerdings diese Frage zu beantworten.

Es ist zu bemerken, dass die Standartabweichungen der Zeitmessungen mit dem Oszilloskop stark variieren. In einigen Fällen ist die Standartabweichung um mehr als 3 Zehnerpotenzen kleiner als der gemessene Mittelwert (z.B. Bei den Messergebnissen für den Rein ohmschen Teiler mit $1.02 \text{ k}\Omega$ haben wir für den dritten Versuchsaufbau $T_a = 2.00\text{ns}$ mit einer Standartabweichung von 640.77as). In solchen Fällen wird das Ergebnis als ohne Messunsicherheit angegeben, da die Standartunsicherheit (und die horizontale Auflösung) vernachlässigbar klein ist. In anderen Fällen wie beispielsweise bei den Messergebnissen für den rein kapazitiven Teiler sieht man für den zweiten Aufbau, dass die Standartabweichung durchaus der Dimension der gemittelten Messgrösse entspricht ($T_{a,optimal} = 55\text{ns}$ mit einer Standartabweichung von 23ns). Daher lässt sich die Messunsicherheit resultierend durch Mittelung, also die Standartabweichung, im Allgemeinen nicht vernachlässigen und ist in jedem einzelnen Fall separat zu behandeln.

6 Anhang

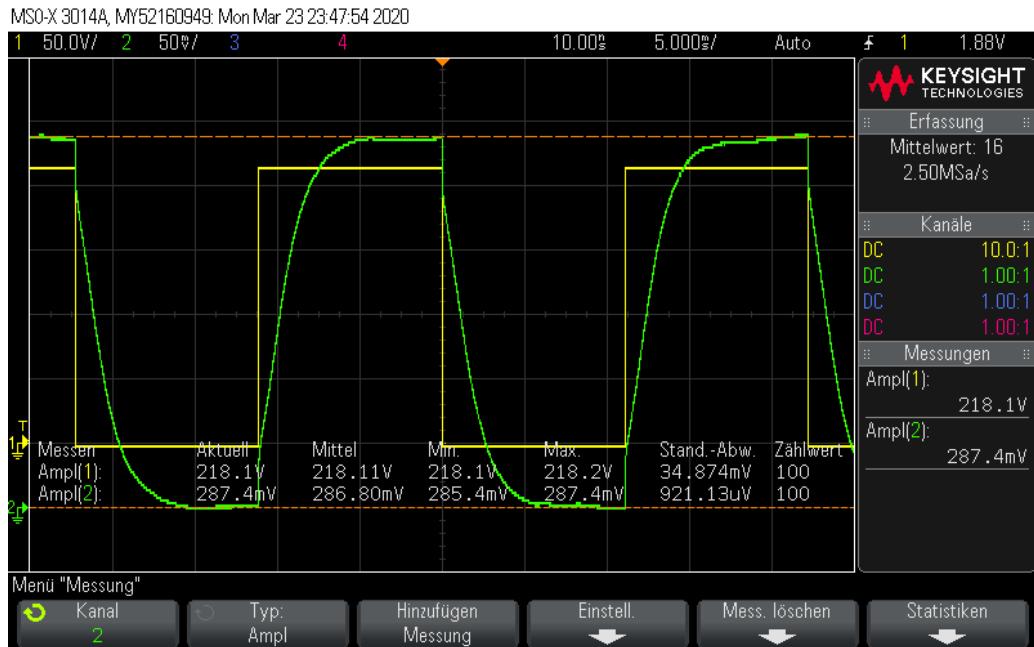


Figure 13: Rein ohmscher Teiler - hochohmig (Z_{HS} : 756 MΩ, Z_{NS} : 1 MΩ, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 10ns/dec, grün: U_{NS} mit 50mV/dec und 5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ)

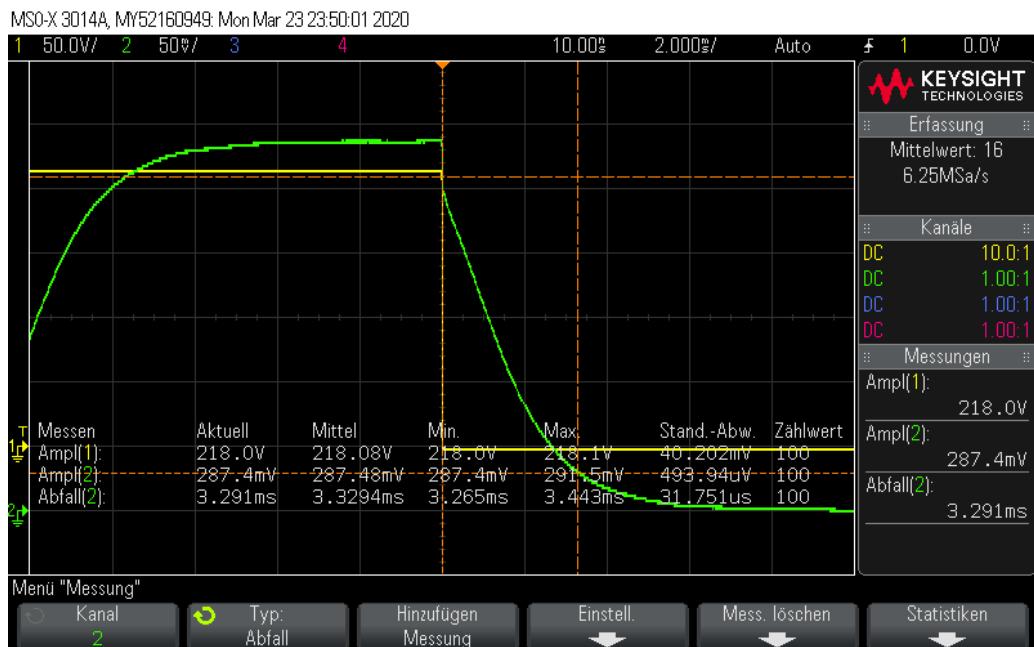


Figure 14: Rein ohmscher Teiler - hochohmig (Z_{HS} : 756 MΩ, Z_{NS} : 1 MΩ, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 10ns/dec, grün: U_{NS} mit 50mV/dec und 5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ)

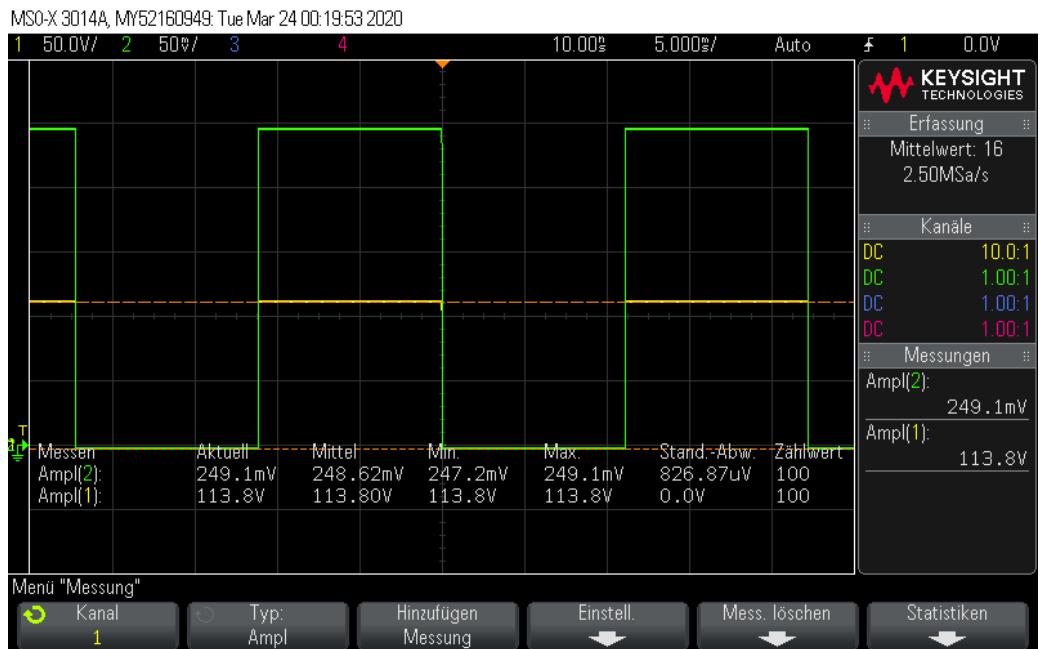


Figure 15: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 16.5 k Ω , Z_{NS} : 36 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 10ns/dec, grün: U_{NS} mit 50mV/dec und 5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

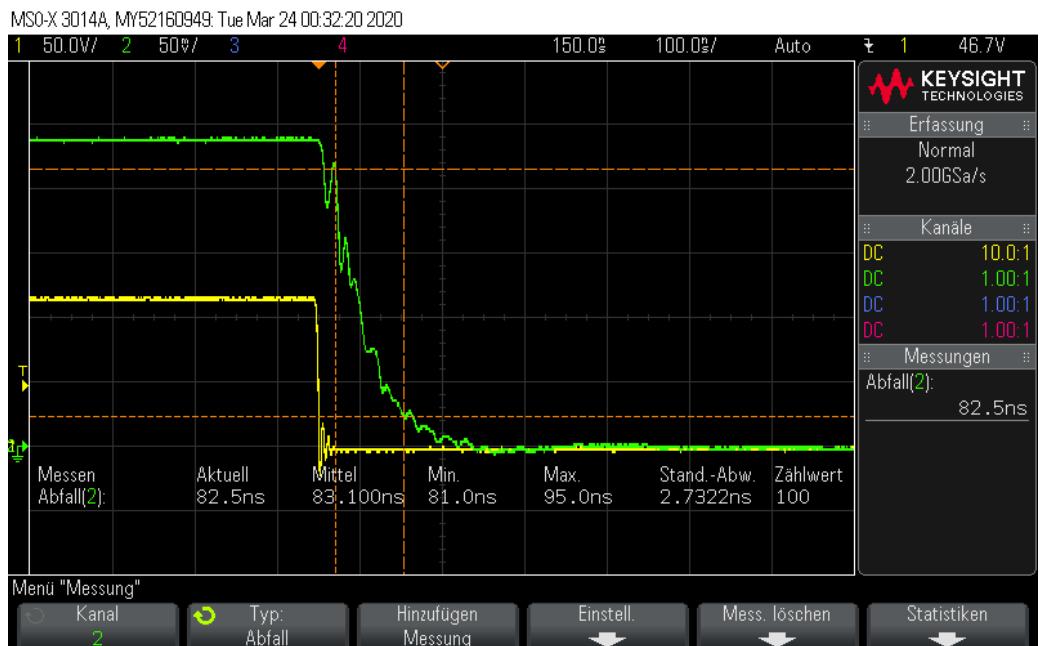


Figure 16: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 16.5 k Ω , Z_{NS} : 36 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 10ns/dec, grün: U_{NS} mit 50mV/dec und 100ns/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

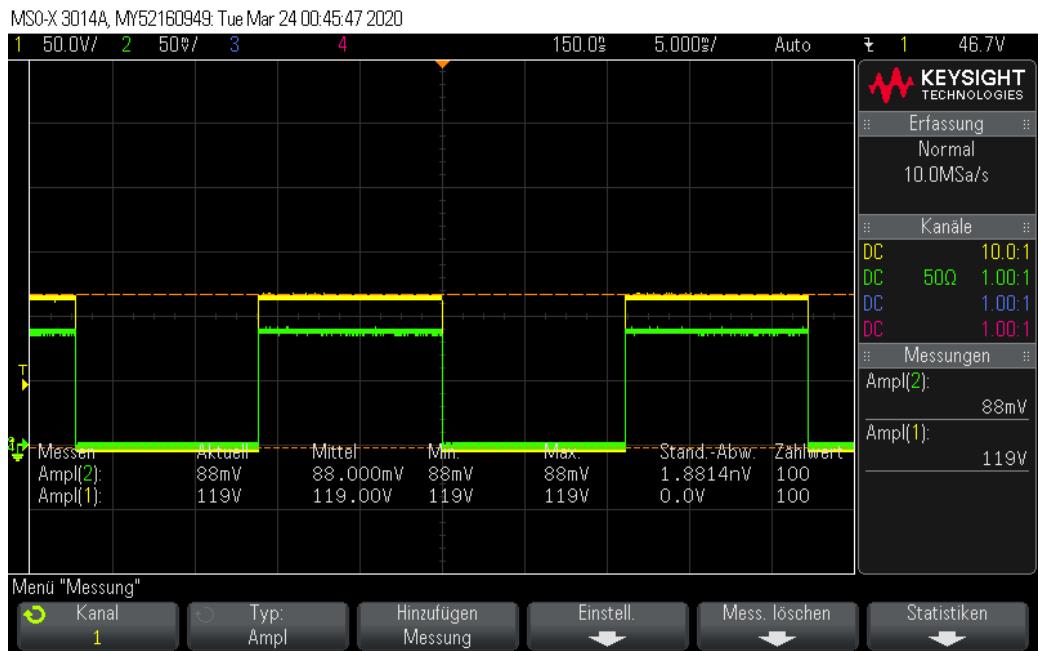


Figure 17: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 16.5 k Ω , Z_{NS} : 36 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 50mV/dec und 5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 50 Ω)



Figure 18: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 16.5 k Ω , Z_{NS} : 36 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 50mV/dec und 5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

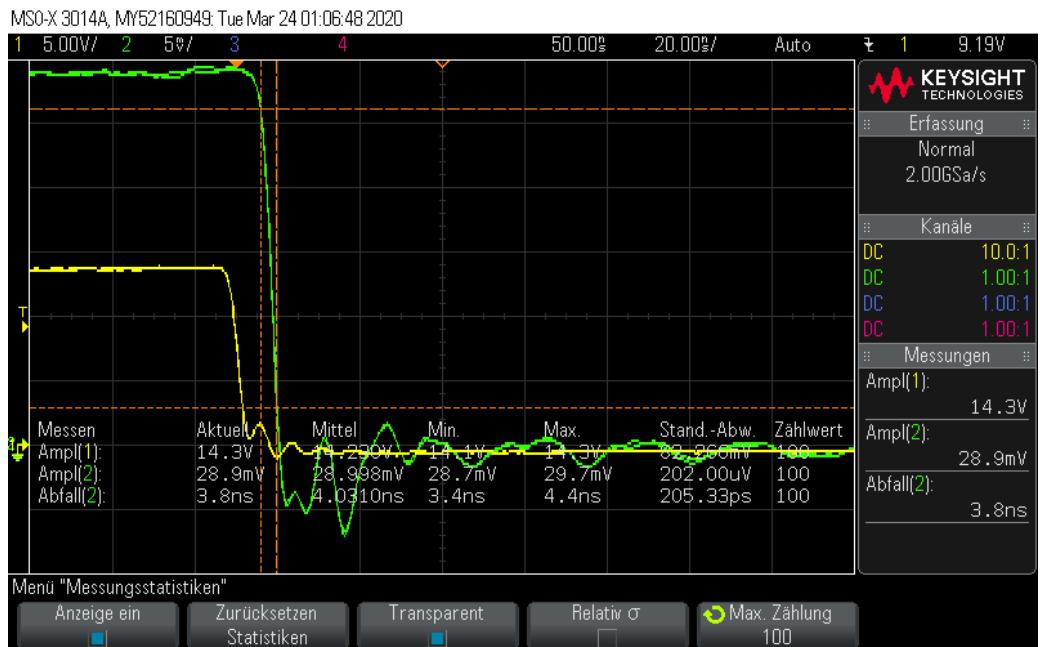


Figure 19: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 1.02 k Ω , Z_{NS} : 2.23 Ω , gelb: U_{HS} mit 5V/dec und 50ns/dec, grün: U_{NS} mit 5mV/dec und 20ns/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

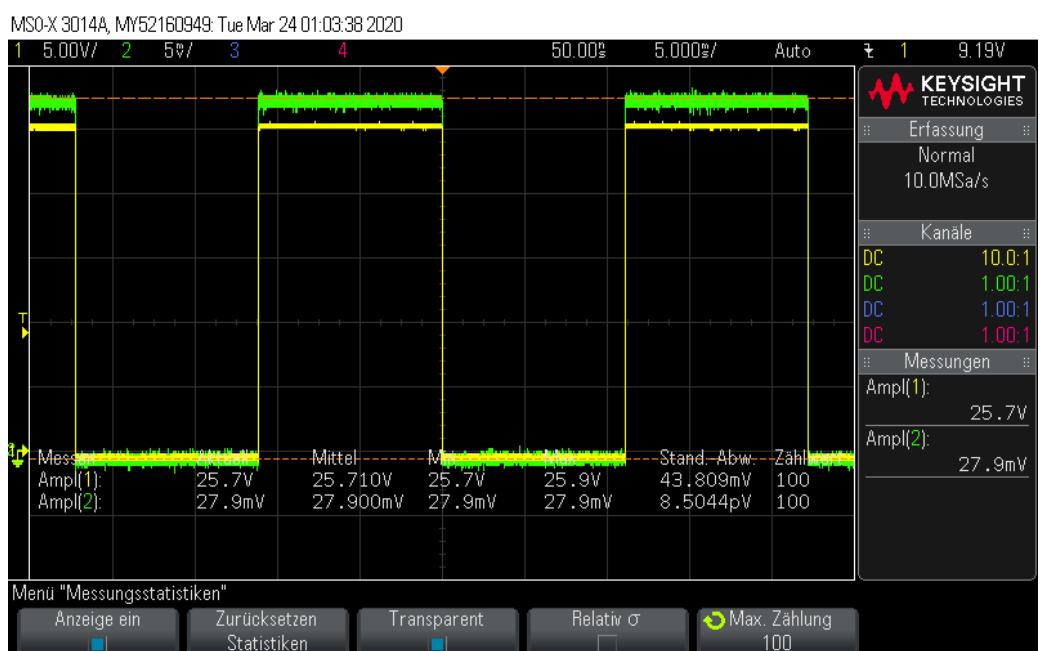


Figure 20: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 1.02 k Ω , Z_{NS} : 2.23 Ω , gelb: U_{HS} mit 5V/dec und 50ns/dec, grün: U_{NS} mit 5mV/dec und 5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)



Figure 21: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 1.02 k Ω , Z_{NS} : 2.15 Ω , gelb: U_{HS} mit 5V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 5mV/dec und 50ns/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

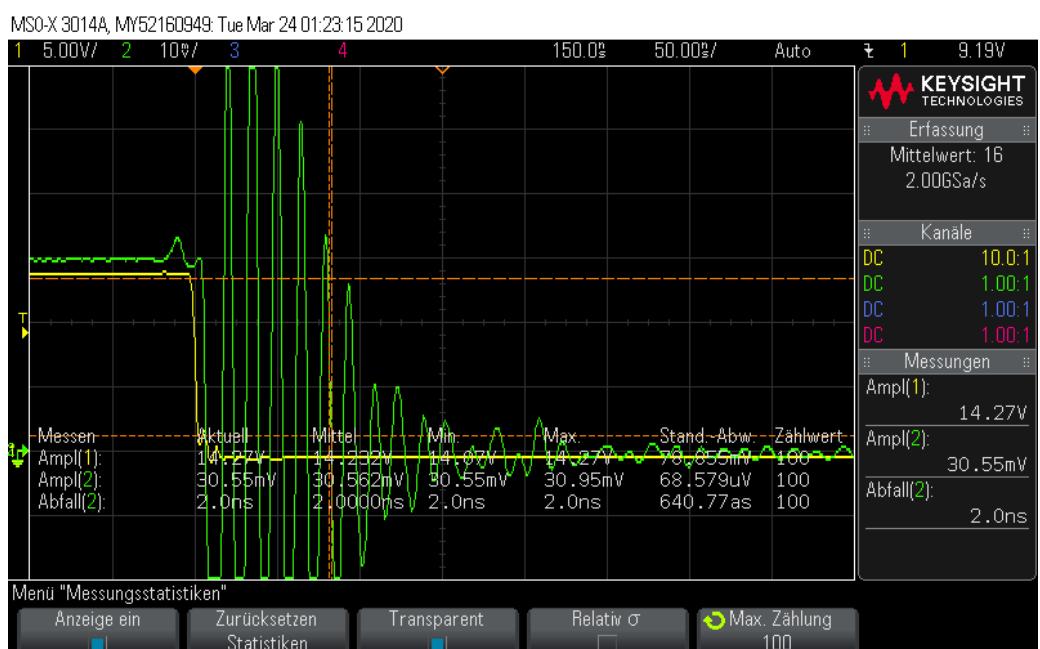


Figure 22: Rein ohmscher Teiler - niederohmig (Z_{HS} : 1.02 k Ω , Z_{NS} : 2.15 Ω (einzel), gelb: U_{HS} mit 5V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 10mV/dec und 50ns/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)



Figure 23: Rein kapazitiver Teiler (Z_{HS} : 313 pF, Z_{NS} : 144 nF, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 4us/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 1us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ



Figure 24: Rein kapazitiver Teiler (Z_{HS} : 313 pF, Z_{NS} : 144 nF, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 3ns/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 0.1us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ

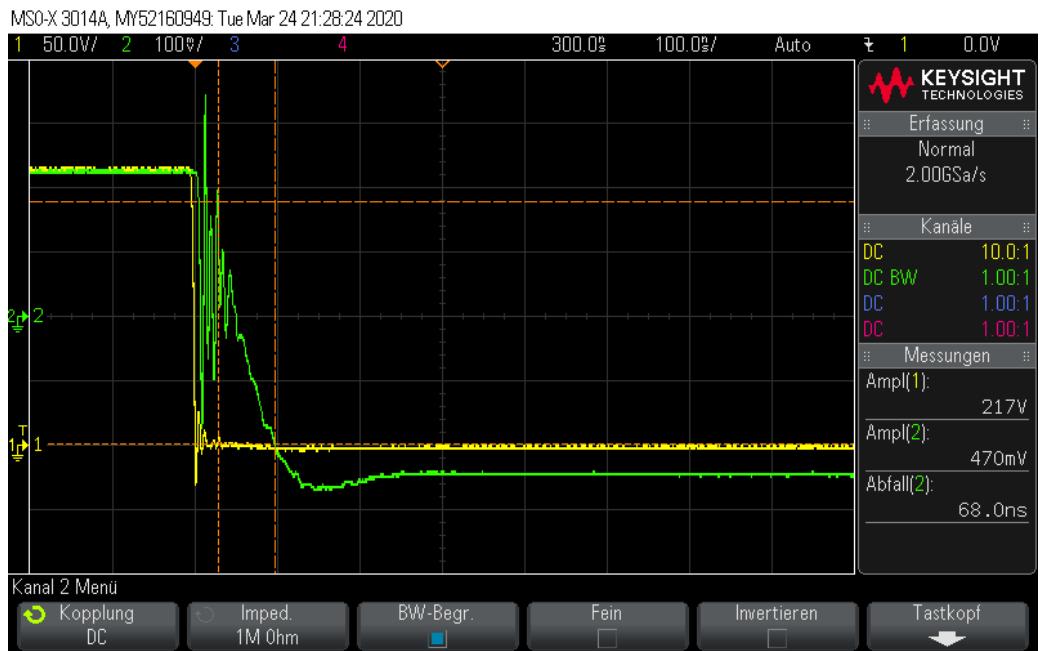


Figure 25: Rein kapazitiver Teiler (Z_{HS} : 313 pF, Z_{NS} : 144 nF, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 300ns/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 100ns/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ

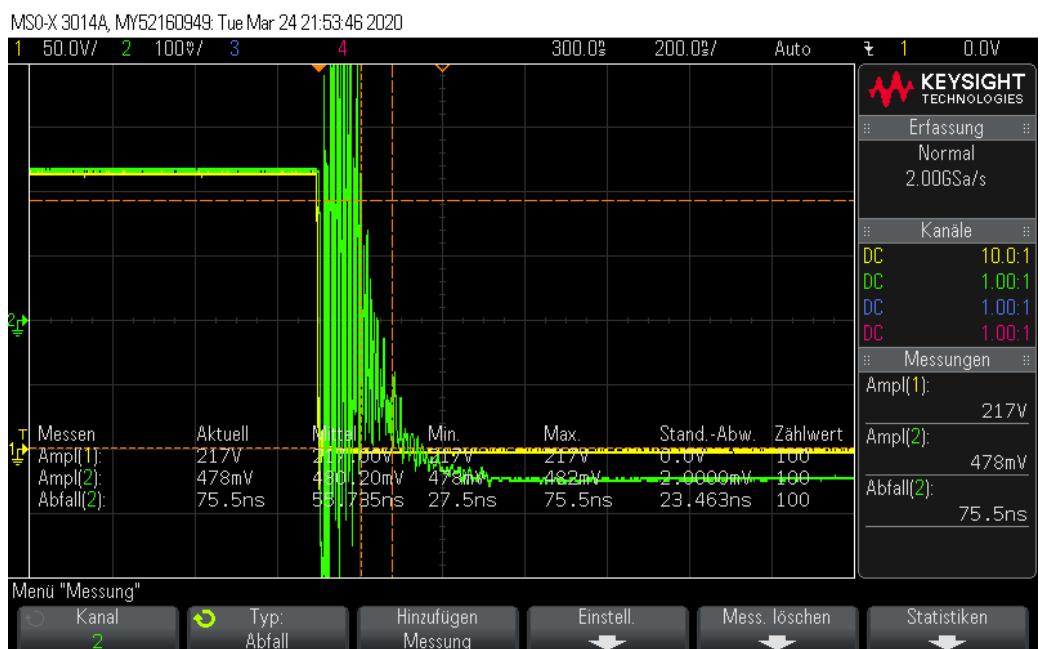


Figure 26: Rein kapazitiver Teiler (Z_{HS} : 313 pF, Z_{NS} : 150 nF, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 0.3us/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 0.2us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ

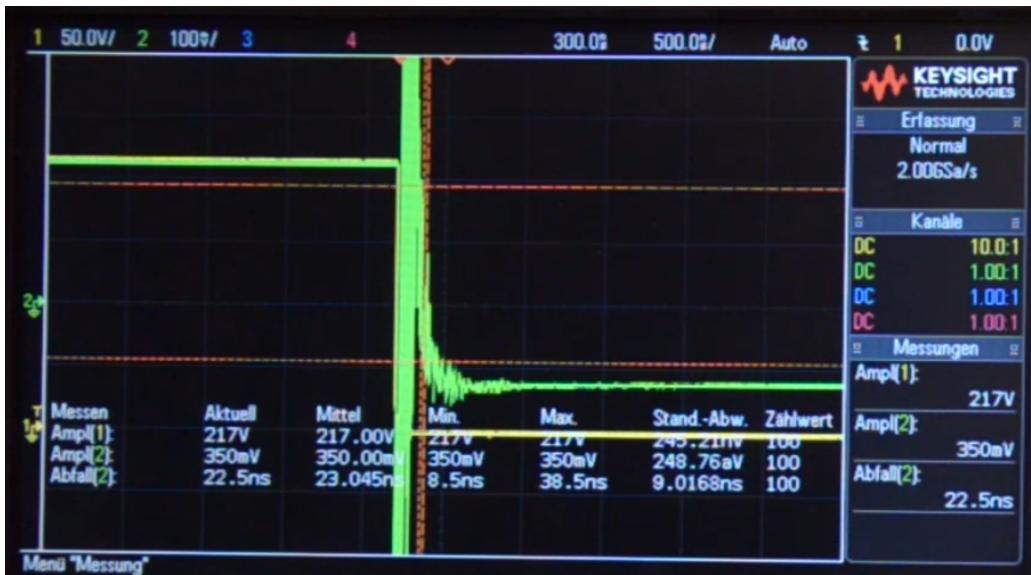


Figure 27: Rein kapazitiver Teiler (Z_{HS} : 313 pF, Z_{NS} : 150 nF (einzel), gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 0.3us/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 0.5us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ)

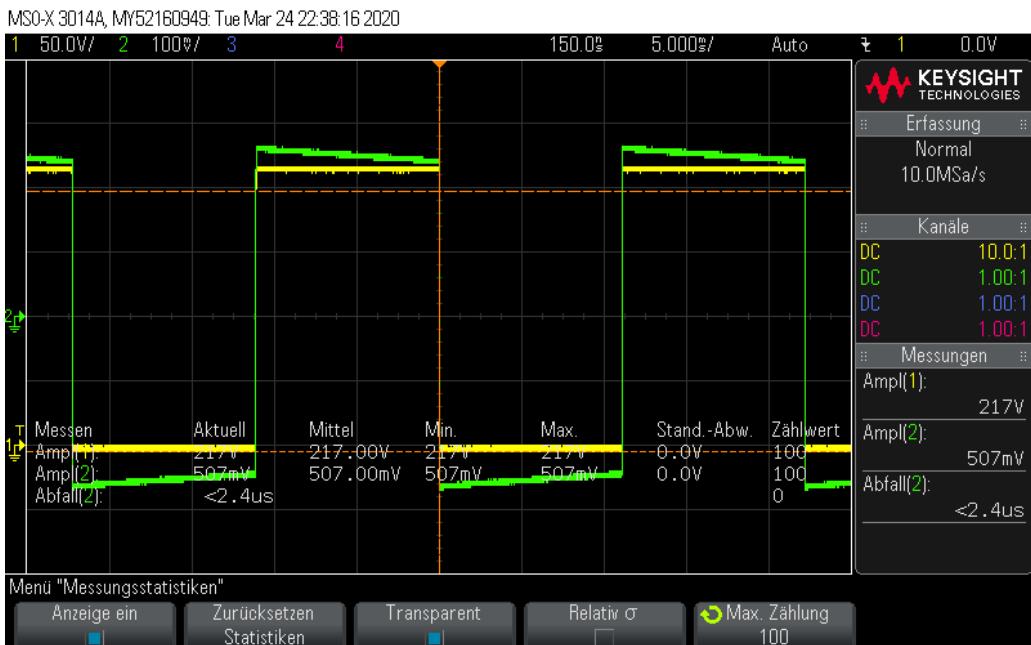


Figure 28: Gedämpft kapazitiver Teiler - (Zaengl-Teiler) (Z_{HS} : 313 pF und 1.02 kΩ, Z_{NS} : 144 nF und 2.23 Ω, gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 5ms/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 MΩ)

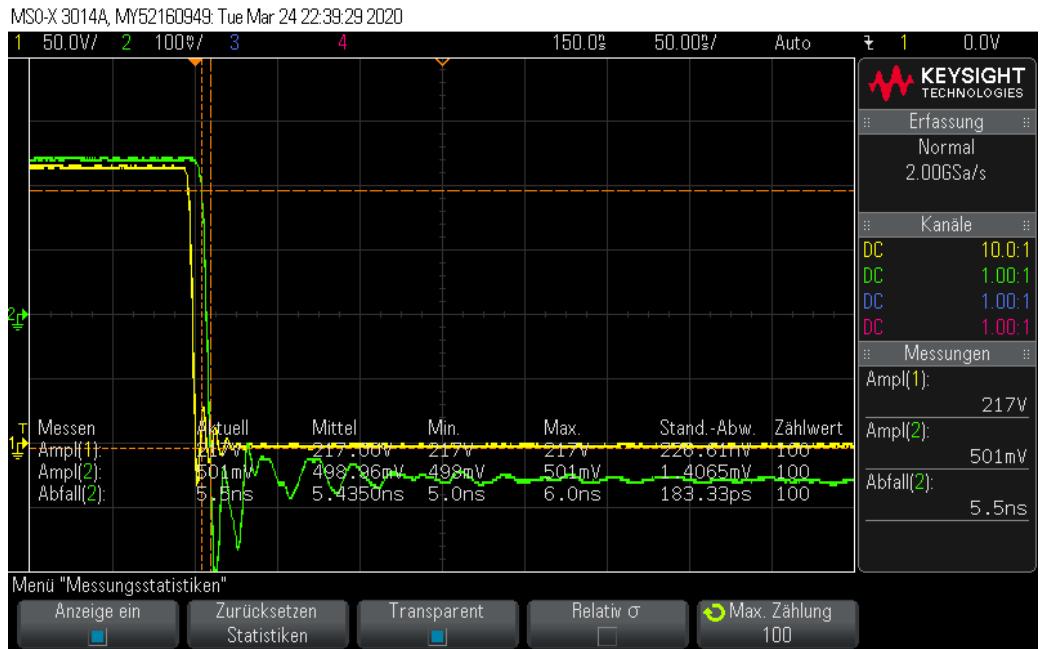


Figure 29: Gedämpft kapazitiver Teiler - (Zaengl-Teiler) (Z_{HS} : 313 pF und 1.02 k Ω , Z_{NS} : 144 nF und 2.23 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 0.05us/dec, DC-Kopplung 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)



Figure 30: Gedämpft kapazitiver Teiler - (Zaengl-Teiler) (Z_{HS} : 313 pF und 1.02 k Ω , Z_{NS} : 144 nF und 2.23 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 0.05us/dec, DC-Kopplung 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

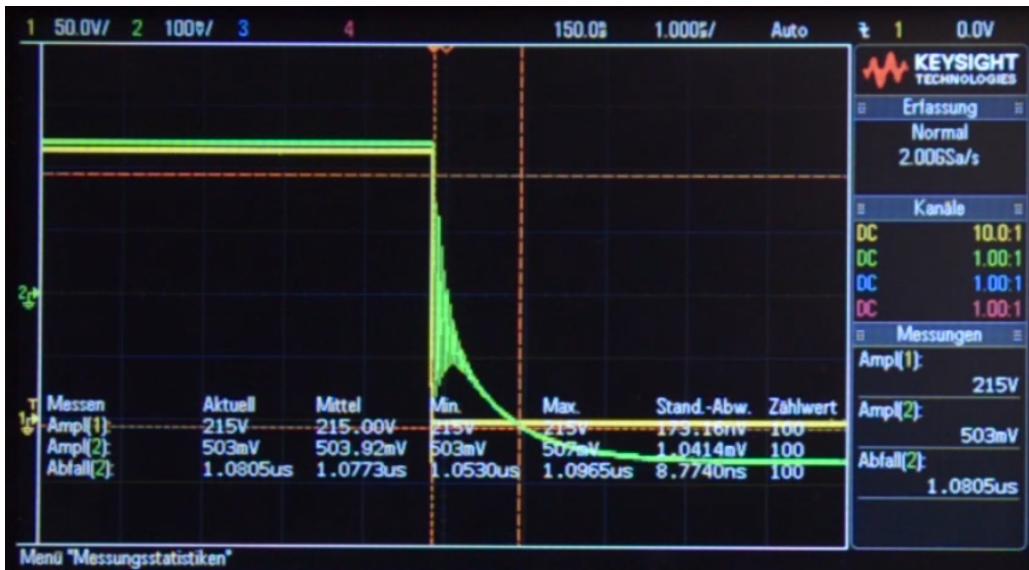


Figure 31: Gedämpft kapazitiver Teiler - (Zaengl-Teiler) (Z_{HS} : 313 pF und 1.02 k Ω , Z_{NS} : 144 nF und 2.23 Ω , gelb: U_{HS} mit 50V/dec und 150ns/dec, grün: U_{NS} mit 100mV/dec und 1us/dec, DC-Kopplung, Tastkopf 1:1, DSO-Impedanz: 1 M Ω)

References

- [1] Prof. Dr. Christian M. Franck. *Laborpraktikum 2 Tastköpfe und Sprungspannungsgenerator*. 2020.
- [2] Prof. Dr. Christian M. Franck. *Laborpraktikum 4 Hochspannungsteiler*. 2020.
- [3] Hans-Jürg Weber. *Vorlesung Messung hoher Spannungen*. 2020.