

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität
Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungstitel: [Signalleitung](#)

Betreuer:

Gruppennummer: [41](#)

Name: [Tanja Maier, Johannes Winkler](#)

Kennzahl: [033 678](#)

Matrikelnummer: [11778750, 00760897](#)

Datum: [20.11.2020](#)

WS [20](#)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen und Grundlagen	3
3 Geräteliste	4
4 Beschreibung der Versuchsanordnung	4
5 Versuchsdurchführung und Messwerte	8
5.1 Zeitlicher Spannungsverlauf an den Enden des Koaxialkabels . . .	8
5.1.1 Angepasster Innenwiderstand	8
5.1.2 Hoher Innenwiderstand	10
5.1.3 Niedriger Innenwiderstand	12
5.2 Bestimmung des Reflexionskoeffizienten	13
5.3 Bestimmung der Signalgeschwindigkeit	20
5.4 Symmetrischer Verzweiger	22
6 Auswertung	22
6.1 Zeitlicher Spannungsverlauf an den Enden des Koaxialkabels . . .	22
6.1.1 Angepasster Innenwiderstand	22
6.1.2 Hoher Innenwiderstand	22
6.1.3 Niedriger Innenwiderstand	23
6.2 Bestimmung des Reflexionskoeffizienten	23
6.3 Bestimmung der Signalgeschwindigkeit	24
6.4 Symmetrischer Verzweiger	25
7 Diskussion	25
8 Zusammenfassung	25
9 Literaturverzeichnis	25

1 Aufgabenstellung

1. Messung und Erklärung des zeitlichen Spannungsverlaufes am Anfang und Ende eines etwa 25-30 m langen Koaxialkabels für angelegte Spannungspulse in folgenden Fällen:
 - (a) angepasster Innenwiderstand der Signalquelle.
 - (b) Signalquelle mit hohem Innenwiderstand.
 - (c) Signalquelle mit niedrigem Innenwiderstand.
2. Bestimmung des Reflexionskoeffizienten des Kabelendes als Funktion des Abschlusswiderstandes und Bestimmung der Kabelimpedanz.
3. Bestimmung der Signalgeschwindigkeit im Koaxialkabel. Aus dem Ergebnis ist die relative Permittivität des Isolatormaterials des Koaxialkabels zu ermitteln.
4. Ein Verzweiger dient dazu, das Signal einer Quelle auf mehrere Empfänger aufzuteilen, ohne dass das Signal durch die Aufteilung gestört wird. Aufgabe: Dimensionierung der Widerstände für einen passiven, symmetrischen Verzweiger und experimentelle Demonstration der Funktion der Schaltung.

2 Voraussetzungen und Grundlagen

Bei Signalen in Kabeln wird am Ende des Kabels ein Teil reflektiert und ein Teil transmittiert. Nach Kirchhoff gilt

$$U_e + U_r = U_t \quad (1)$$

$$I_e - I_r = I_t \quad (2)$$

Variablen mit e als Subskript beziehen sich immer auf ein einlaufendes Signal, während r für reflektiert und t für transmittiert steht.

Es wird zusätzlich noch der Reflexionskoeffizient benötigt, welcher definiert ist als

$$\rho = \frac{U_r}{U_e} \quad (3)$$

Durch die Impedanz des Kabels $Z_K = \frac{U_e}{I_e} = \frac{U_r}{I_r}$ und vom Anschluss $Z_A = \frac{U_t}{I_t}$ folgt für den Reflexionskoeffizienten

$$\rho = \frac{Z_A - Z_K}{Z_A + Z_K} \quad (4)$$

3 Geräteliste

Tabelle 1: Liste der verwendeten Geräte

Abk.	Typ	Daten	Inv.Nr.
O	Oszilloskop DSO-X 2022A		
FG1	Frequenzgenerator BK precision 4063		
K1	Koaxialkabel 1	$\ell_1 = (0.50 \pm 0.01) \text{ m}$	
K2	Koaxialkabel 2	$\ell_2 = (31.20 \pm 0.01) \text{ m}$	
R1	Widerstand	$R1 = (1794 \pm 18) \Omega$	
R2	Widerstand	$R2 = (1195 \pm 12) \Omega$	
R3	Widerstand	$R3 = (676.6 \pm 6.8) \Omega$	
R4	Widerstand	$R4 = (330.36 \pm 3.30) \Omega$	
R5	Widerstand	$R5 = (179.8 \pm 1.8) \Omega$	
R6	Widerstand	$R6 = (100.40 \pm 1.00) \Omega$	
R7	Widerstand	$R7 = (68.40 \pm 0.68) \Omega$	
R8	Widerstand	$R8 = (47.60 \pm 0.47) \Omega$	
R9	Widerstand	$R9 = (33.30 \pm 0.33) \Omega$	
R10	Widerstand	$R10 = (12.38 \pm 0.12) \Omega$	
R11	Widerstand	$R11 = (18.32 \pm 0.18) \Omega$	

4 Beschreibung der Versuchsanordnung

Im ersten Teil der wird der zeitliche Spannungsverlauf am Anfang und Ende des Kabels gemessen. Dabei variiert der Innenwiderstand der Signalquelle. Die Abbildungen 1, 3 und 5 beschreiben den Aufbau.

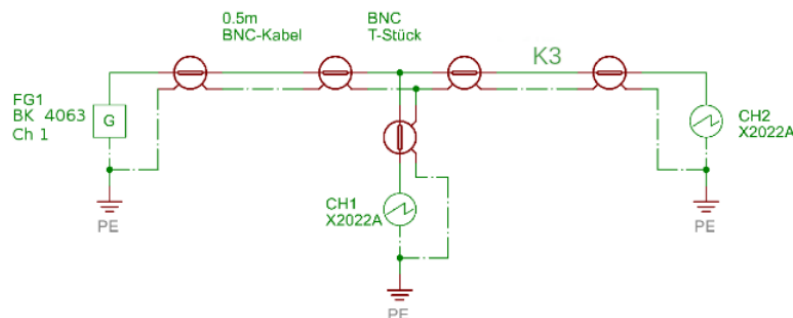


Abbildung 1: Versuch 1 (a): Signalquelle (FG1) ist mit dem zu testenden Koaxialkabel verbunden. CH1 des Oszilloskops misst den Spannungsverlauf am Anfang des Kabels und CH2 am Ende.

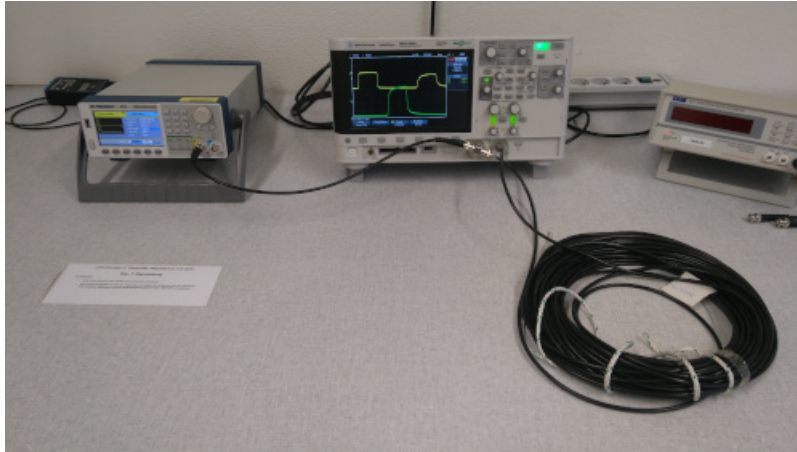


Abbildung 2: Versuch 1 (a) als Foto. Die Kurven am Oszilloskop zeigen die Daten aus Grafik 9.

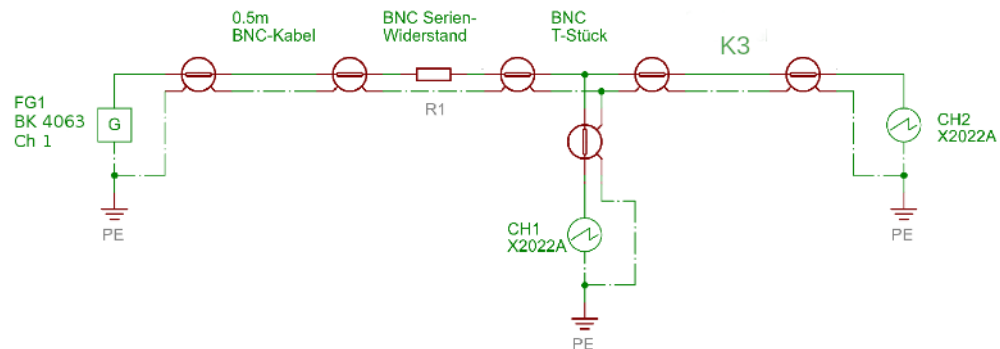


Abbildung 3: Versuch 1 (b): Signalquelle (FG1) ist mit dem zu testenden Koaxialkabel verbunden. Erhöhung des Innenwiderstandes von FG1 durch in Serie geschalteten Widerstand. CH1 des Oszilloskops misst den Spannungsverlauf am Anfang des Kabels und CH2 am Ende.

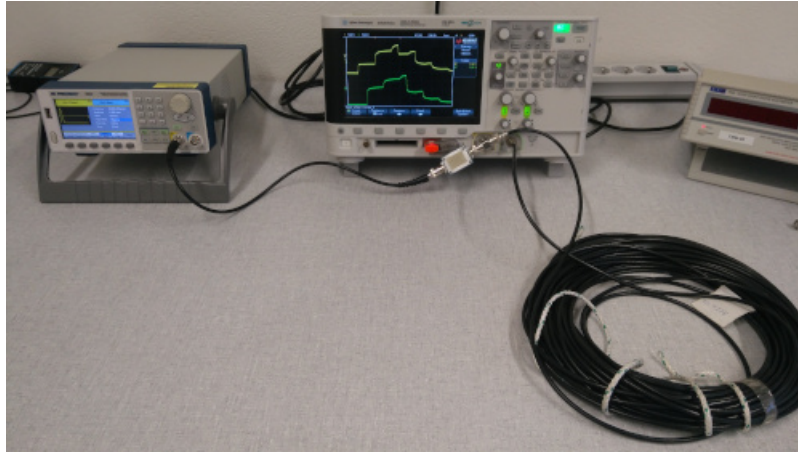


Abbildung 4: Versuch 1 (b) als Foto. Die Kurven am Oszilloskop zeigen die Daten aus Grafik 14.

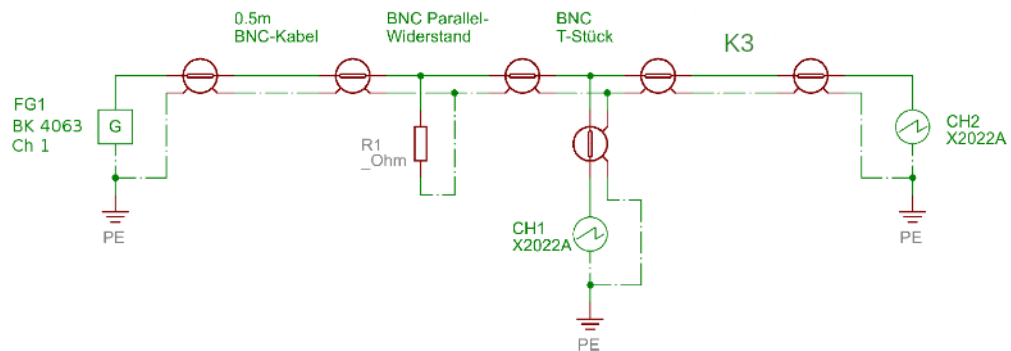


Abbildung 5: Versuch 1 (c): Signalquelle (FG1) ist mit dem zu testenden Koaxialkabel verbunden. Senkung des Innenwiderstandes von FG1 durch parallel geschalteten Widerstand. CH1 des Oszilloskops misst den Spannungsverlauf am Anfang des Kabels und CH2 am Ende.

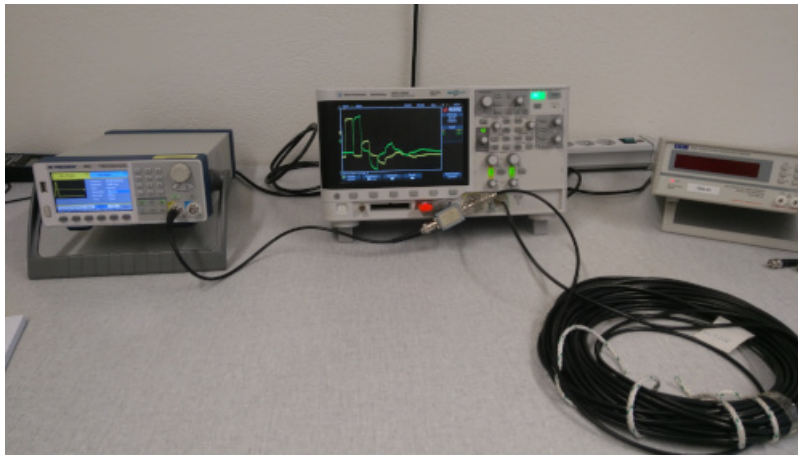


Abbildung 6: Versuch 1 (c) als Foto. Die Kurven am Oszilloskop zeigen die Daten aus Grafik 15.

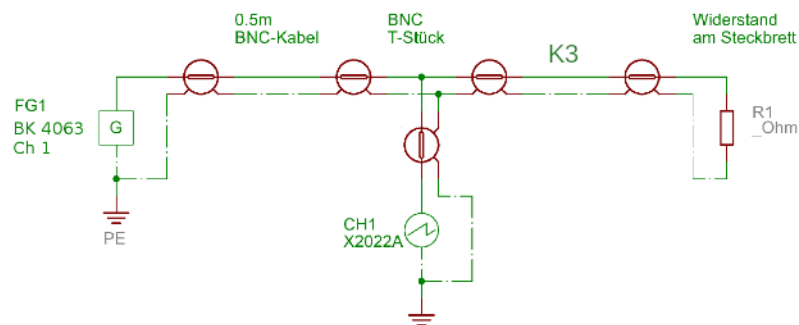


Abbildung 7: Versuch 2: Signalquelle (FG1) ist mit dem zu testenden Koaxialkabel verbunden. CH1 des Oszilloskops misst den Spannungsverlauf am Anfang des Kabels. Am Ende des Kabels befindet sich ein Widerstand. Durch diesen Aufbau kann der Reflexionskoeffizient gemessen werden.

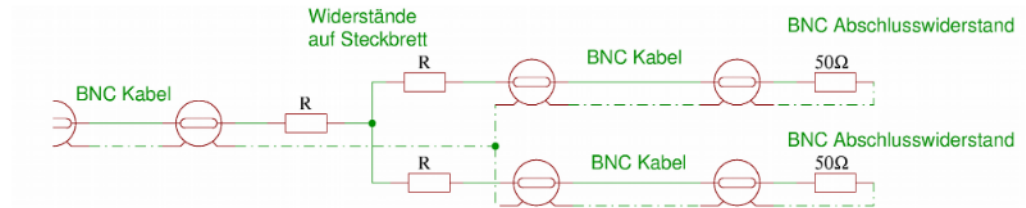


Abbildung 8: Versuch 4: Aufbau eines symmetrischen Verzweigers. R ist so zu wählen, dass keine Reflexionen auftreten.

5 Versuchsdurchführung und Messwerte

5.1 Zeitlicher Spannungsverlauf an den Enden des Koaxialkabels

5.1.1 Angepasster Innenwiderstand

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 beschrieben bzw. in Abbildung 2 als Foto dargestellt. Der Frequenzgenerator wird auf **Pulse** mit einer Frequenz von 30 kHz eingestellt. Zusätzlich wird **PulseWidth** auf 100 ns, 240 ns, 500 ns und 750 ns gesetzt.

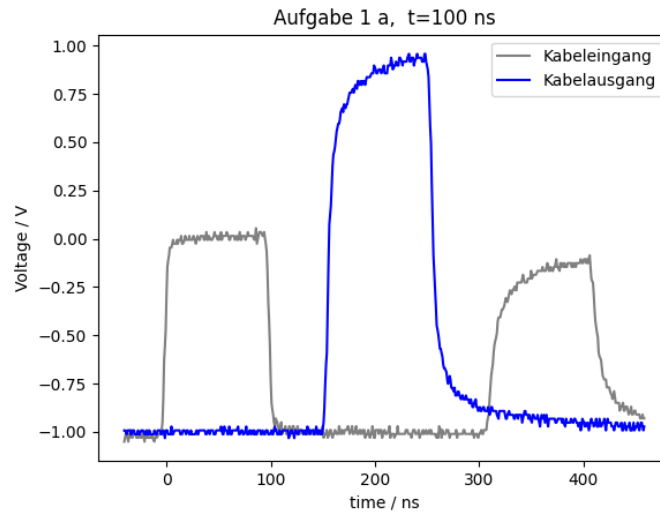


Abbildung 9: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels mit $t_p = 100$ ns.

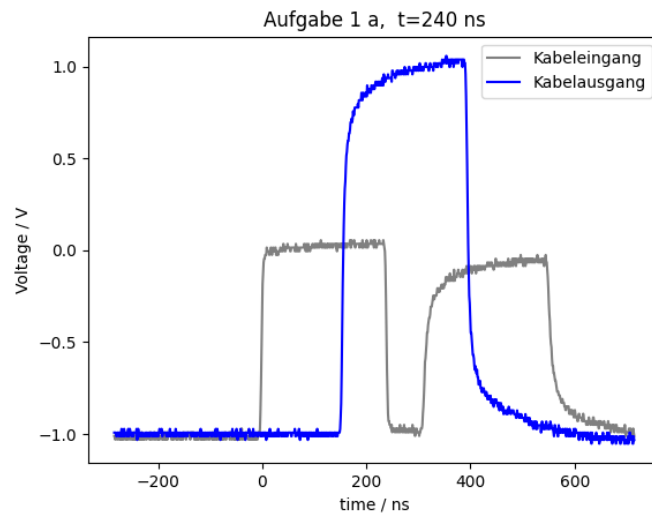


Abbildung 10: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels mit $t_p = 240$ ns.

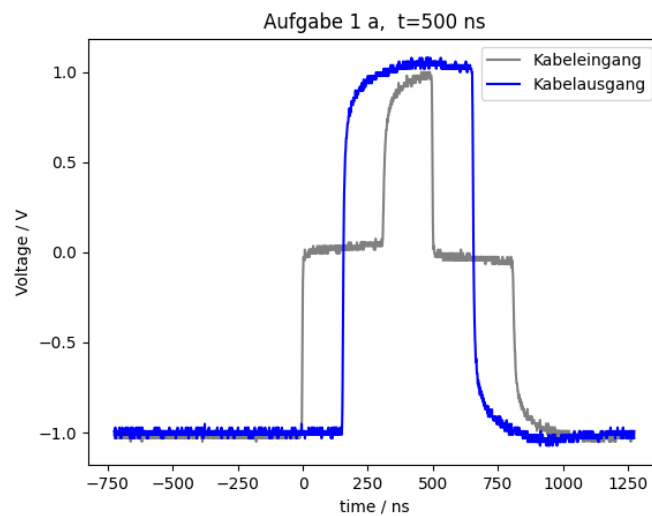


Abbildung 11: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels mit $t_p = 500$ ns.

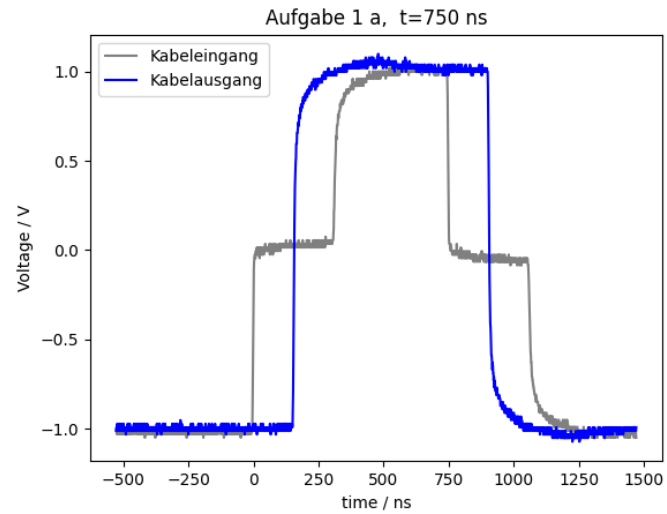


Abbildung 12: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels mit $t_p = 750$ ns.

5.1.2 Hoher Innenwiderstand

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 beschrieben. Hier soll ein Puls $t_p = 150$ ns und einmal $t_p = 2.3 \mu\text{s}$ als Signal verwendet werden.

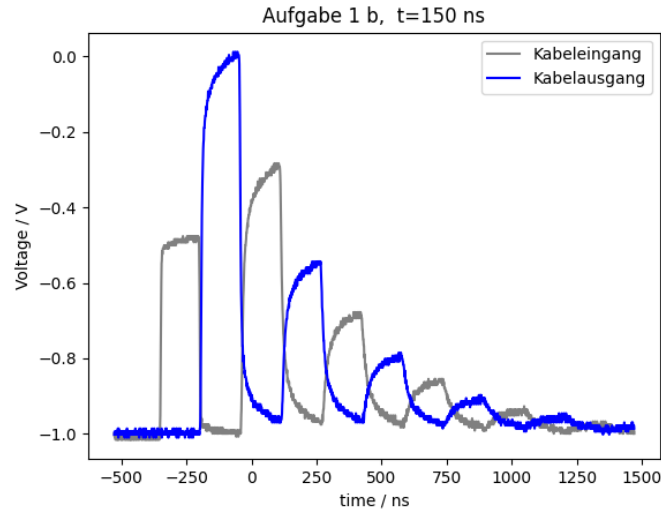


Abbildung 13: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels. Hoher Innenwiderstand der Signalquelle. Channel 1 ist Spannung am Beginn des Kabels, Channel 2 am Ende. $t_p = 150$ ns.

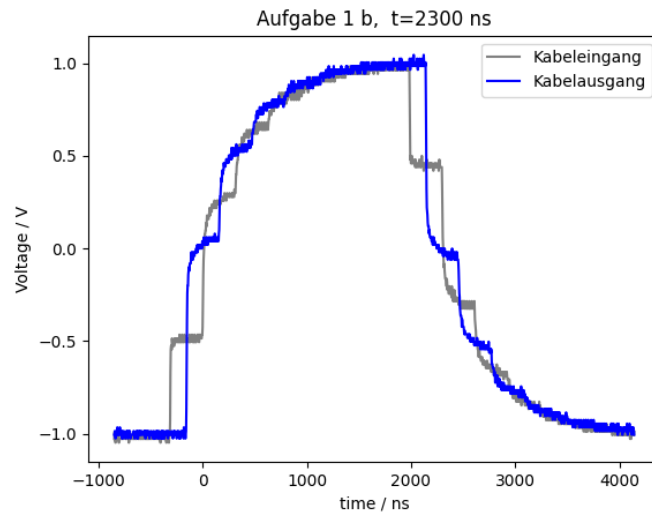


Abbildung 14: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels. Hoher Innenwiderstand der Signalquelle. Channel 1 ist Spannung am Beginn des Kabels, Channel 2 am Ende. $t_p = 2.3$ μ s.

5.1.3 Niedriger Innenwiderstand

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 beschrieben. Hier soll ein Puls $t_p = 150 \text{ ns}$ und einmal $t_p = 2.65 \mu\text{s}$ als Signal verwendet werden.

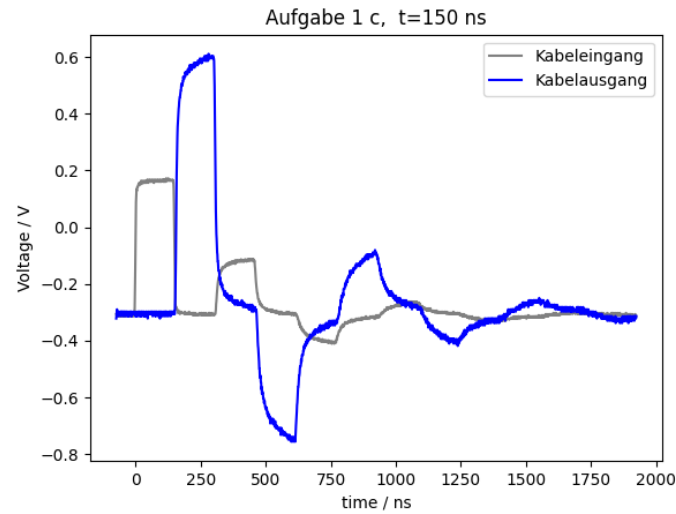


Abbildung 15: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels. Niedriger Innenwiderstand der Signalquelle. Channel 1 ist Spannung am Beginn des Kabels, Channel 2 am Ende. $t_p = 150 \text{ ns}$.

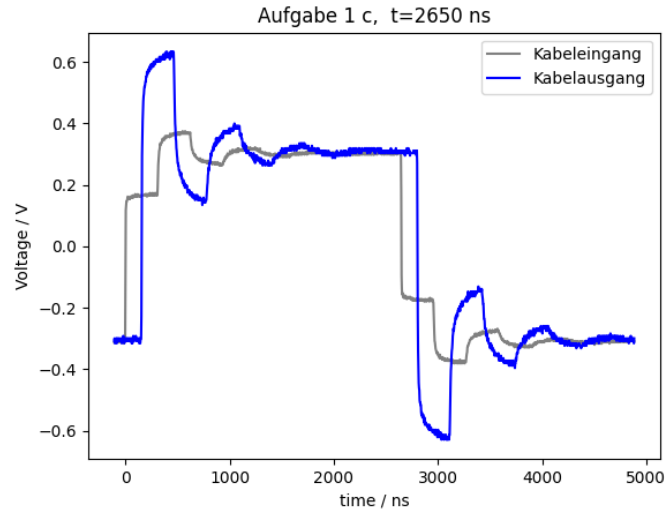


Abbildung 16: Spannungsverlauf an beiden Enden des Koaxialkabels. Niedriger Innenwiderstand der Signalquelle. Channel 1 ist Spannung am Beginn des Kabels, Channel 2 am Ende. $t_p = 2.65 \mu\text{s}$.

5.2 Bestimmung des Reflexionskoeffizienten

Der Versuchsaufbau ist in Grafik 7 beschrieben.

Die Frequenz wurde auf 30 kHz gestellt und die Pulszeit $t_p = 200$ ns. Jetzt stehen 11 verschiedene Widerstände zur Verfügung (siehe Geräteliste), welche jeweils als Abschlusswiderstand des Kabels genutzt werden. Diese Widerstände werden hier nochmal in einer Tabelle zusammengefasst.

Einige dieser Widerstände wurden mehrmals gemessen. In diesem Fall wird der Mittelwert herangezogen bzw. die Standardabweichung auf die 10%-ige Unsicherheit addiert (sofern signifikant). Diese Widerstände sind der Vollständigkeit halber auch in der Geräteliste zusammengefasst.

Tabelle 2: Widerstände für diesen Versuch.

Bezeichnung	Wert
R1	$R1 = (1794 \pm 18) \Omega$
R2	$R2 = (1195 \pm 12) \Omega$
R3	$R3 = (676.6 \pm 6.8) \Omega$
R4	$R4 = (330.36 \pm 3.30) \Omega$
R5	$R5 = (179.8 \pm 1.8) \Omega$
R6	$R6 = (100.40 \pm 1.00) \Omega$
R7	$R7 = (68.40 \pm 0.68) \Omega$
R8	$R8 = (47.60 \pm 0.47) \Omega$
R9	$R9 = (33.30 \pm 0.33) \Omega$
R10	$R1 = (1794 \pm 18) \Omega$
R11	$R1 = (1794 \pm 18) \Omega$

Im Gegensatz zu Aufgabe 1 wird hier nur die Eingangsspannung gemessen. Der Eingangswiderstand der Signalquelle ist angepasst, so wie in 1 (a). Am Ende des Kabels werden verschiedene Widerstände angeschlossen. Der Spannungsverlauf dieser Widerstände wird in den Grafiken 17 bis 28 dargestellt.

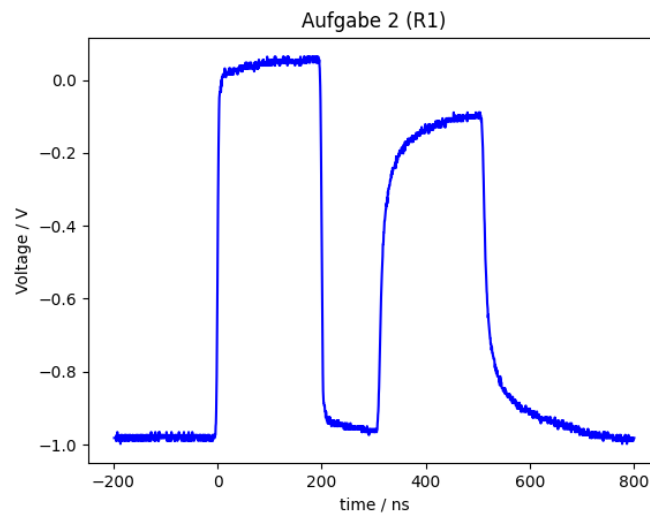


Abbildung 17: Spannungsverlauf am Kabeingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R1 = (1794 \pm 18) \Omega$

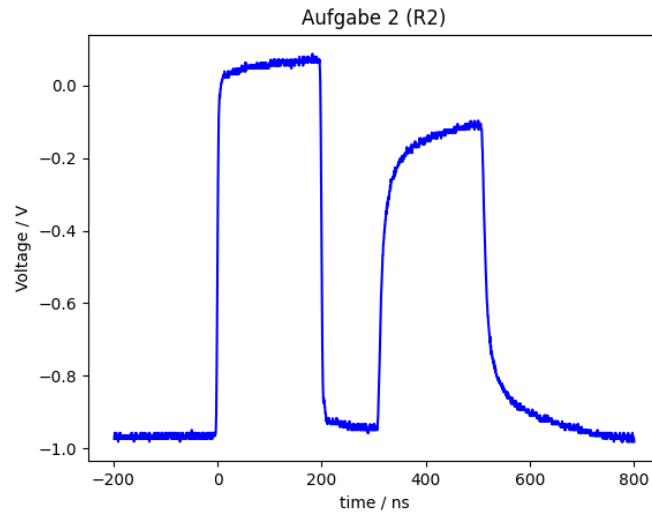


Abbildung 18: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_2 = (1195 \pm 12) \Omega$

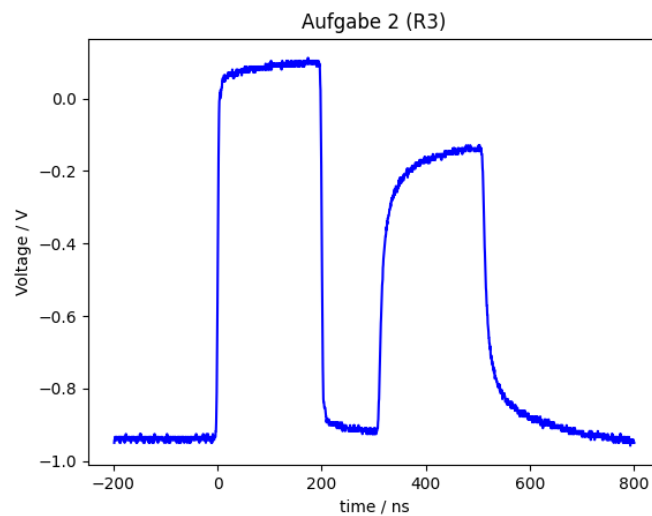


Abbildung 19: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_3 = (676.6 \pm 6.8) \Omega$

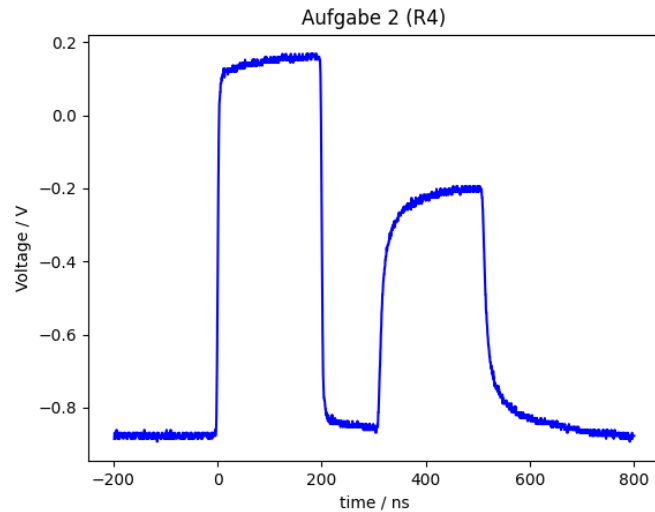


Abbildung 20: Spannungsverlauf am Kabeingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_4 = (330.36 \pm 3.30) \Omega$

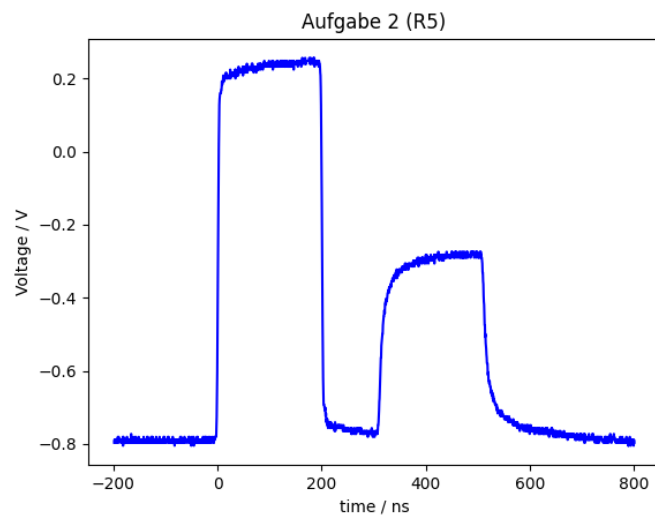


Abbildung 21: Spannungsverlauf am Kabeingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_5 = (179.8 \pm 1.8) \Omega$

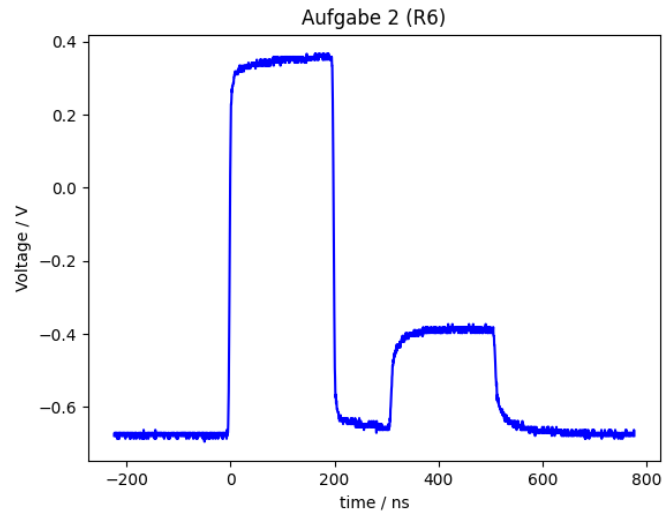


Abbildung 22: Spannungsverlauf am Kabeingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_6 = (100.40 \pm 1.00) \, \Omega$

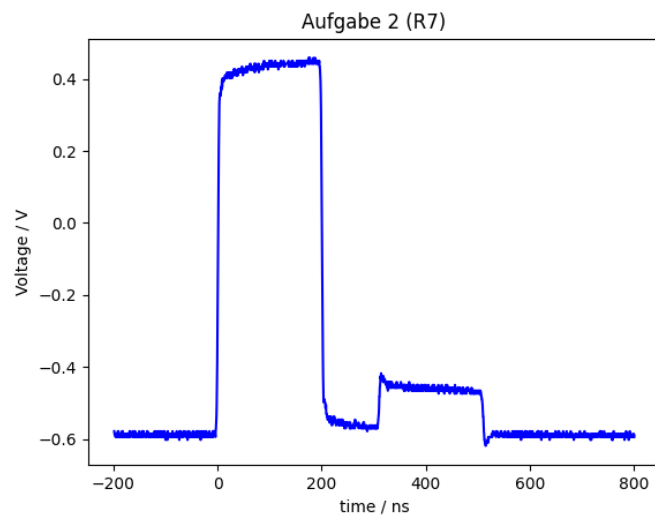


Abbildung 23: Spannungsverlauf am Kabeingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_7 = (68.40 \pm 0.68) \, \Omega$

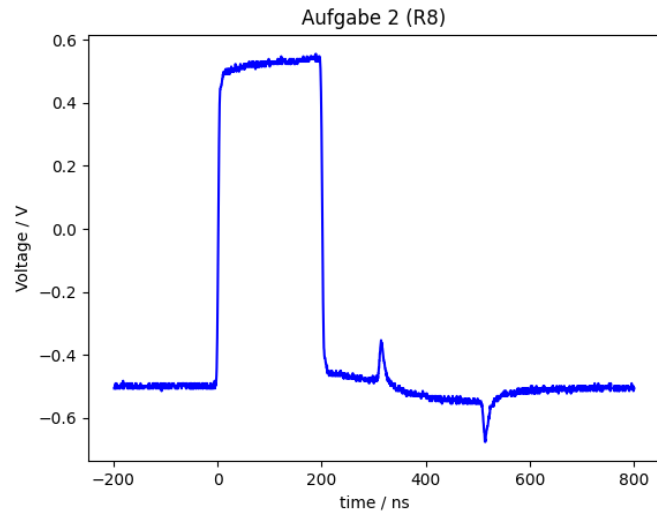


Abbildung 24: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R8 = (47.60 \pm 0.47) \Omega$

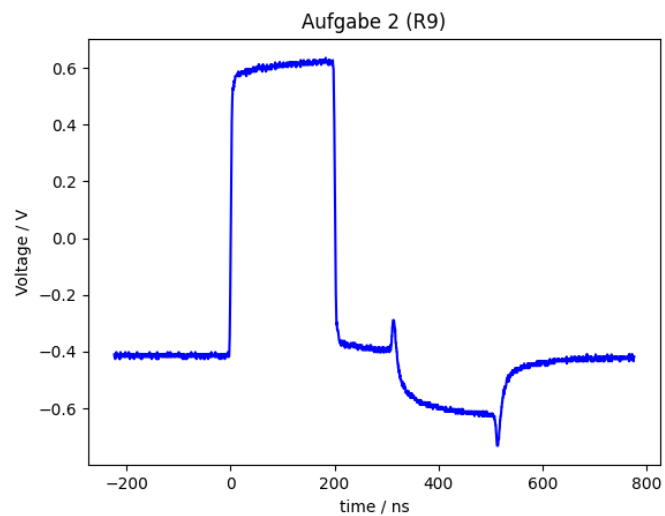


Abbildung 25: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R9 = (33.30 \pm 0.33) \Omega$

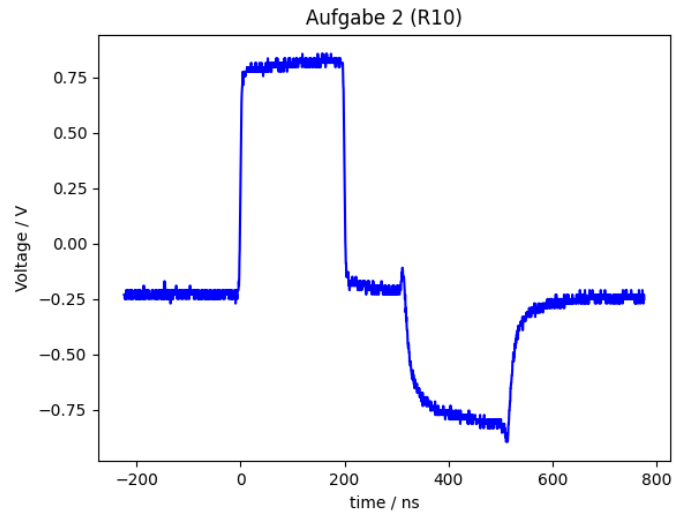


Abbildung 26: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_{10} = (12.38 \pm 0.12) \Omega$

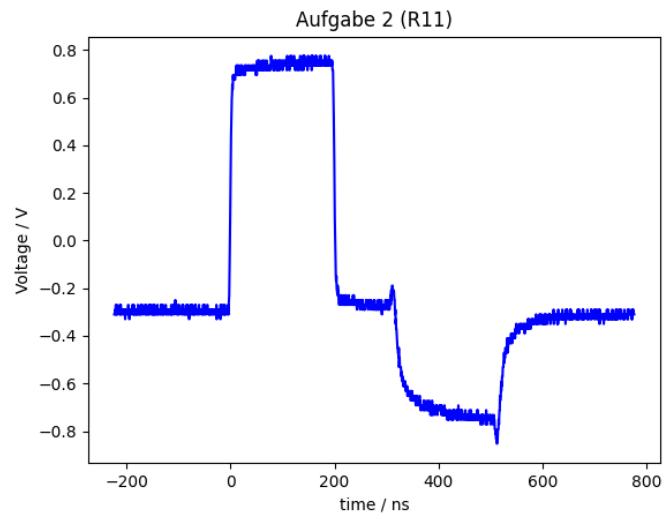


Abbildung 27: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich der Widerstand $R_{11} = (18.32 \pm 0.18) \Omega$

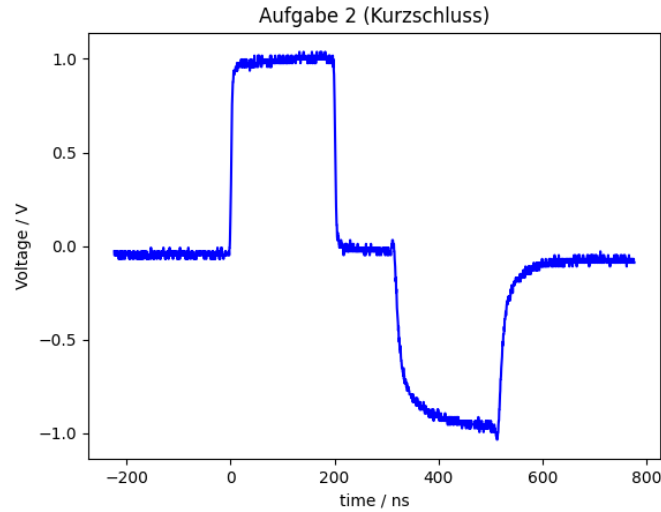


Abbildung 28: Spannungsverlauf am Kabeleingang. Am Kabelausgang befindet sich ein Kurzschluss

5.3 Bestimmung der Signalgeschwindigkeit

Hierbei wird ein Puls ausgesendet und jene Zeit gemessen, bis der reflektierte Impuls gemessen wird. Es eignen sich dafür die Signale mit $t_p = 100$ ns und $t_p = 240$ ns aus Aufgabe 1 (a). Die Zeitmessung ist in den Grafiken 29 und 30 veranschaulicht.

Die abgelesenen Zeiten werden in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Zeitpunkt von einem Puls t_1 bis zu dessen Reflexion t_2 . Das Ablesen erfolgt händisch aus den Daten an jenem Punkt, wo die Spannung die Schwelle von -0.8 V übersteigt. Wegen des Rauschens ist die Unsicherheit von t_1, t_2 jeweils 5 ns und $\Delta\tau = 10$ ns.

t_p / ns	t_1 / ns	t_2 / ns	τ / ns
100	-3.13	310.16	313.29
240	-3.38	308.63	312.01

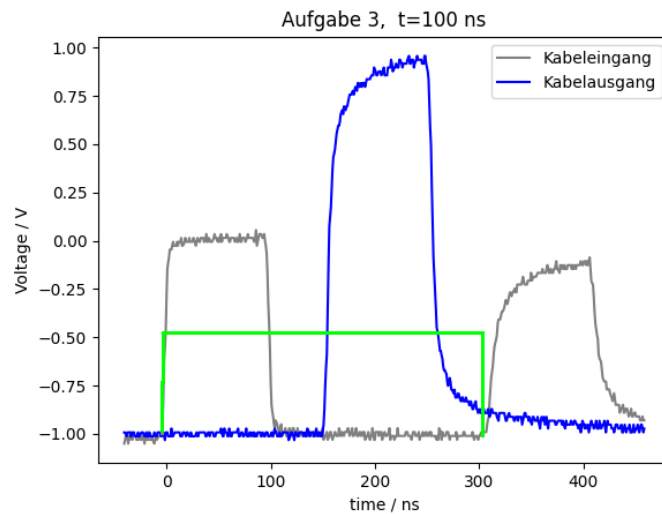


Abbildung 29: Zeitmessung (grün) bei einem Signal mit einer Pulsdauer von 100 ns.

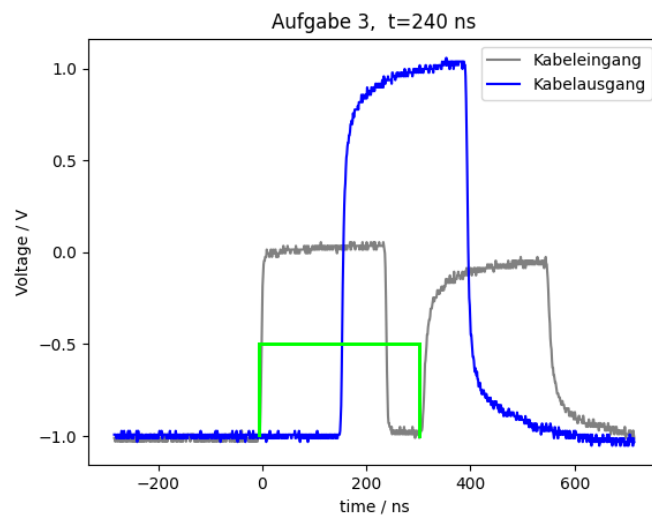


Abbildung 30: Zeitmessung (grün) bei einem Signal mit einer Pulsdauer von 240 ns.

5.4 Symmetrischer Verzweiger

6 Auswertung

6.1 Zeitlicher Spannungsverlauf an den Enden des Koaxialkabels

6.1.1 Angepasster Innenwiderstand

Die Grafiken 9 bis 12 beschreiben den Spannungsverlauf am Anfang und am Ende des Kabels mit angepassten Widerstand. Nachdem das Signal durch das Kabel läuft, wird es am Ende reflektiert, da es sich um ein offenes Ende handelt. Das Signal in die eine Richtung überlagert sich mit dem Signal aus der entgegengesetzten Richtung und es entsteht Interferenz. Durch den angepassten Innenwiderstand in der Signalquelle wird das Signal dort nicht reflektiert. Daher legt das Signal den Weg durch das Kabel zwei mal zurück (vom Anfang zum Ende, und retour).

Am Kabelausgang wird das Signal bei der Reflexion mit sich selbst überlagert, daher ist am Kabelausgang eine Verdoppelung der Spannung zu erkennen.

Dies lässt sich am Beispiel von 9 zeigen. Von 0 ns bis 100 ns wird der erste Puls gesendet. Dieser wird bei 170 ns bis 270 ns am Kabelausgang gemessen. Danach wird er zwischen 310 ns und 410 ns wieder am Kabeleingang gemessen. Man erkennt deutlich, dass der Puls bei der Reflexion am Kabelausgang seine Rechtecksform verliert. Das reflektierte Signal am Kabeleingang hat eine ähnliche Form wie bei der Interferenz am Kabelende.

Grafik 10 ist ähnlich wie Grafik 9. Durch den längeren Puls ist der zeitliche Abstand des Eingangssignals mit dem reflektierten Signal deutlich geringer. Bei einer weiteren Erhöhung der Pulsdauer ist eine Überlagerung am Signaleingang zu erwarten.

In Grafik 11 tritt genau diese Überlagerung auf. Die beiden Rechteckspulse werden teilweise überlagert und es kommt zur Verdoppelung der Spannung an der Überlappung der beiden Signale.

Mit Steigerung der Pulsdauer steigt die Überlappung der Signale. Grafik 12 zeigt das deutlich. Für sehr lange Pulsdauern wäre die Verzögerung durch das Kabel vernachlässigbar und man würde am Kabeleingang die doppelte Spannung sehen.

6.1.2 Hoher Innenwiderstand

Durch den hohen Innenwiderstand ist am Anfang des Kabels eine Reflexion zu beobachten. Durch die stärkere Reflexion sieht man, dass eine *Treppenfunktion* entsteht, da sich die Signale mehrfach im Kabel hin und her bewegen und sich ständig überlagern. Da die Höhe der Treppen immer kleiner wird, lässt sich darauf schließen, dass das Signal beim mit mehrmaligem Vor- und Zurücklauf kontinuierlich abgeschwächt wird.

Grafik 13 ist ein Sonderfall. Wie schon in Grafik 9 zu sehen ist, benötigt das Signal durch das Kabel circa 150 ns. Da die Pulsdauer auf genau diese Zeit

eingestellt ist, lässt sich eine gewisse Periodizität erkennen. Zu Beginn wird ein Puls der Länge 150 ns gesendet. Dieser wird eben nach 150 ns am Kabelausgang mit doppelter Spannung (wegen Interferenz) gemessen und wieder zum Kabelanfang reflektiert. 150 ns später wird er am Kabeleingang gemessen und erneut reflektiert. Damit wird der Puls abwechselnd am Kabeleingang und Kabelausgang gemessen, während die Amplitude durch den Widerstand in jeder Periode abnimmt.

Grafik 14 hingegen zeigt einen Puls, der deutlich länger ist als 150 ns. Es wird ein Puls durch das Kabel gesendet, ca. 150 ns später wird er in doppelter Höhe am Kabelausgang reflektiert. Weitere 150 ns später gelangt das Signal wieder an den Kabeleingang, wo allerdings noch die Spannung des Pulses anliegt. Daher wird am Kabeleingang das reflektierte Signal mit dem immer noch andauernden Puls überlagert und erhöht sich entsprechend. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, wobei das reflektierte Signal sich durch den Widerstand abschwächt, sodass die Sprünge in der Treppenfunktion immer geringer werden.

6.1.3 Niedriger Innenwiderstand

Durch die Senkung des Widerstandes im Kabelanschluss, sinkt die Anschlussimpedanz Z_A unter jene der Kabelimpedanz Z_K . Wegen $Z_A < Z_K$ ist der Reflexionskoeffizient negativ und es folgt $\rho < 0$ wegen Gleichung (4). Damit wird die Spannung bei der Reflexion umgekehrt.

Grafik 15 zeigt diesen Fall für 150 ns Pulsdauer. Während der erste Eingangspuls und dessen Reflexion am Ausgang noch deutlich zu erkennen ist, wird der Ausgangspuls am Kabelanfang ins negative umgekehrt, was sich aber durch den reflektierten Impuls aufhebt. Durch die Pulsdauer von 150 ns sieht man alle 150 ns einen Sprung.

6.2 Bestimmung des Reflexionskoeffizienten

Zu Beginn muss die Eingangsspannung U_e und die reflektierte Spannung U_r gemessen werden. in Tabelle 4 sind die jeweiligen Werte dargestellt. Zusätzlich wurde der Reflexionskoeffizient berechnet. Der Reflexionskoeffizient kann auf zwei verschiedene Arten bestimmt werden, nämlich mit den Formeln (3) und (4). Für die nachfolgende Tabelle wird Formel (3) verwendet.

Tabelle 4: Bestimmung der Eingangs- und Ausgangsspannung für alle Widerstände R1 bis R11 und für einen Kurzschluss. Zusätzlich wurde der Reflexionskoeffizient ρ und dessen Unsicherheit berechnet.

Widerstand Nr.	U_e / mV	U_r / mV	ρ / 1	$\Delta\rho$ / 1
R1	1020	874	0.86	
R2	1026	848	0.82	
R3	1026	781	0.76	
R4	1026	668	0.65	
R5	1023	505	0.49	
R6	1024	287	0.28	
R7	1026	127	0.12	
R8	1025	-30	-0.03	
R9	1022	-181	-0.17	
R10	1038	-533	-0.51	
R11	1034	-415	-0.40	
Kurzschluss	1037	-445	-0.43	

Nach Formel (4) gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Ausgangswiderstand, der Kabelimpedanz und den Reflexionskoeffizienten

$$\rho = \frac{Z_A - Z_K}{Z_A + Z_K}$$

wobei für Z_A die Widerstände aus Tabelle 4 eingesetzt werden können. Insbesondere jene Werte von R7 und R8 sind von Interesse, da sich genau an dieser Stelle das Vorzeichen ändert. Durch lineare Interpolation ergibt sich

$$0 \approx \rho \left(R8 + \frac{\rho(R7) - \rho(R8)}{R7 - R8} \cdot (0 - \rho(R8)) \right) = \rho((\pm) \Omega)$$

6.3 Bestimmung der Signalgeschwindigkeit

Der elektrische Impuls legt den Weg $s = 2 \cdot \ell_2$ zurück. Wenn dafür die Zeit τ benötigt wird, dann gilt insgesamt mit Größtfehlermethode

$$c = \left(\frac{2 \cdot \ell_2}{\tau} \pm \left| \frac{2 \cdot \Delta \ell_2}{\tau} + \frac{2 \cdot \ell_2}{\tau^2} \cdot \Delta \tau \right| \right)$$

Man setzt $\tau = 312.65$ ns (Mittelwert aus Tabelle 3) und $\Delta \tau = 10$ ns. Aus der Geräteliste kann man $\ell_2 = (31.20 \pm 0.01)$ m ablesen. Daraus folgt

$$c = (199584 \pm 6448) \text{ km/s}$$

Die relative Permittivität des Isoliermaterials ist hier außerdem zu berechnen. Aus $\varepsilon \cdot \mu = \frac{1}{c^2}$ folgt inklusive Fehleranalyse

$$\varepsilon_r = \frac{1}{c^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_0} \pm \left| \frac{\Delta c}{c^3 \cdot \mu \cdot \varepsilon_0} \right|$$

mit der elektrischen Feldkonstanten ε_0 , der magnetischen Feldkonstanten μ_0 , sowie $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ und $\mu_r = 1$. Daraus folgt

$$\varepsilon_r = 2.26 \pm 0.07$$

6.4 Symmetrischer Verzweiger

7 Diskussion

8 Zusammenfassung

9 Literaturverzeichnis

- [1] Unterlagen aus Moodle, A. Hohenau, bereitgestellt von der KF Universität Graz.