

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: 5

Übungstitel: Signalleitung (KFU)

Betreuer: Francesco Presel

Gruppennummer: 42

Name: Nico Eisner

Name: Philip Waldl

Mat. Nr.: 12214121

Mat. Nr.: 12214120

Datum der Übung: 12.01.2024

WS 2023/2024

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen & Grundlagen	3
2.1	Signalausbreitung in Kabeln	3
2.2	Begriffe	4
2.3	Wichtige Zusammenhänge	4
3	Versuchsanordnung	4
3.1	Spannungsverläufe	5
3.2	Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz	5
3.3	Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität	5
3.4	Verzweiger	6
4	Geräteliste	6
5	Versuchsdurchführung & Messergebnisse	6
5.1	Spannungsverläufe	6
5.2	Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz	8
5.3	Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität	9
5.4	Verzweiger	9
6	Auswertung und Unsicherheitsanalyse	10
6.1	Spannungsverläufe	10
6.2	Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz	12
6.3	Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität	13
6.4	Verzweiger	13
7	Diskussion	13
7.1	Spannungsverläufe	13
7.2	Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz	14
7.3	Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität	14
7.4	Verzweiger	14
8	Zusammenfassung	14
8.1	Spannungsverläufe	14
8.2	Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz	14
8.3	Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität	15
8.4	Verzweiger	15
	Literatur	15

1 Aufgabenstellung

Der Versuch Signalleitung behandelt, wie der Titel bereits vermuten lässt, das Thema Signalleitung. Dabei wird vor allem Wert auf das Signal bei verschiedenen Widerständen gelegt. Weiters sollen aber auch Größen wie Reflexionskoeffizient und Signalgeschwindigkeit bestimmt werden.

Die genaue Aufgabenstellung sieht wie folgt aus:

- Messung und Erklärung des zeitlichen Spannungsverlaufes 25-30 m Koaxialkabel bei
 - angepasstem Innenwiderstand der Signalquelle
 - einer Signalquelle mit hohem Innenwiderstand
 - einer Signalquelle mit niedrigem Innenwiderstand
- Bestimmung Reflexionskoeffizient des Kabelendes und Bestimmung der Kabelimpedanz
- Bestimmung Signalgeschwindigkeit im Koaxialkabel und relative Permittivität des Isolatormaterials des Koaxialkabels
- Dimensionierung der Widerstände für einen passiven, symmetrischen Verzweiger mit Demonstration

Alle Informationen und Methodiken wurden uns von der Technischen Universität bereitgestellt [1].

2 Voraussetzungen & Grundlagen

2.1 Signalausbreitung in Kabeln

Wenn eine ebene Welle auf ein verschieden dichtes Medium trifft, wird sie teilweise reflektiert. Selbiges gilt auch für elektrische Wellen, welche durch einen Leiter laufen und dann auf einen Widerstand treffen. Durchläuft ein Spannungspuls also eine Leitung mit offenem Ende, so wird diese dort beim Auftreffen reflektiert und wird in die entgegengesetzte Leitungsrichtung zurückgestoßen. Bei einem Kabelende mit höherem Widerstand wird das Signal zwar auch reflektiert, jedoch nun gespiegelt. Dieses Verhalten wird als Reflexionskoeffizient ρ festgehalten und gibt das Verhältnis von reflektiertem- und eingetroffenem Strahl wieder. Mittels folgender Formel kann dieser Reflexionskoeffizient auch berechnet werden:

$$\text{Reflexionskoeffizient} \quad \rho = \frac{U_R}{U_E} = \frac{Z_A - Z_K}{Z_A + Z_K} \quad \Delta\rho = \left| \frac{\partial\rho}{\partial U_R} * \Delta U_R \right| + \left| \frac{\partial\rho}{\partial U_E} * \Delta U_E \right| \quad (1)$$

Deswegen muss bei höherfrequenten Signalen die Leistungs- und Abschlussimpedanz immer aufeinander abgestimmt werden, damit es nicht zu ungewollten Signalüberlagerungen kommen kann. Bei BNC-Kabeln und BNC-Abschlüssen bzw BNC-Geräten ist dieser Innenwiderstand / Impedanzwert auf 50 Ω genormt.

Außerdem kann für verschiedene Kabel die Signalgeschwindigkeit v je nach Dichte des Leiters bestimmt werden. Im Optimalfall wäre diese Geschwindigkeit natürlich die Lichtgeschwindigkeit, welche aber in Realität aufgrund der Permittivität des Dielektrikums nicht erreicht wird.

$$\text{Signalgeschwindigkeit} \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{s}{t} \quad \Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial s} * \Delta s \right| + \left| \frac{\partial v}{\partial t} * \Delta t \right| \quad (2)$$

Dabei gilt $1/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ als sogenannter Verkürzungsfaktor, welcher die Signalgeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit gegenüberstellt. Der Verkürzungsfaktor von gewöhnlichen Koaxialkabeln liegt dabei bei etwa 66%.

2.2 Begriffe

Für diesen Versuch ist es weiters wichtig, einige Begriffe zu kennen und zu verstehen.

Tab. 1: Definitionen [1]

Kapazität	Maß für die Fähigkeit eines Körpers oder Systems, elektrische Ladung zu speichern [3]
Induktivitätsbelag	Induktivität einer elektrischen Leitung pro Länge dieser Leitung [4]
Widerstandsbelag	Widerstand einer elektrischen Leitung pro Länge dieser Leitung [4]
Kabelimpedanz	Das Verhältnis von reflektierter und transmittierter Amplitude der Welle an einer Grenzfläche. [5]
Abschlussimpedanz	Technische Ausführung eines hochfrequenz-tauglichen Widerstands, der z.B. für Messzwecke oder zur Vermeidung von Reflexionen als Last an eine Signalquelle oder Leitung angeschlossen wird. [2]

2.3 Wichtige Zusammenhänge

$$\text{Permittivität} \quad \epsilon_r = \frac{c^2}{v^2} = \frac{s}{t} \quad \Delta \epsilon_r = \left| \frac{\partial \epsilon_r}{\partial v} * \Delta v \right| \quad (3)$$

3 Versuchsanordnung

Anhand der folgenden Schaltpläne wurden die Schaltungen jeder Aufgabe in die Tat umgesetzt.

3.1 Spannungsverläufe

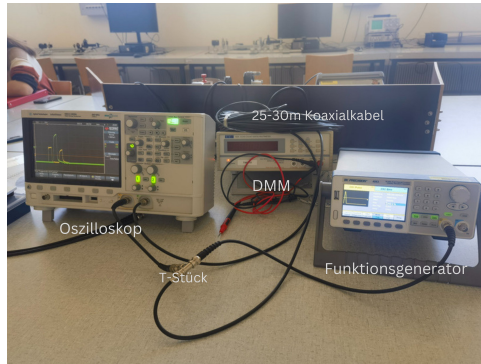
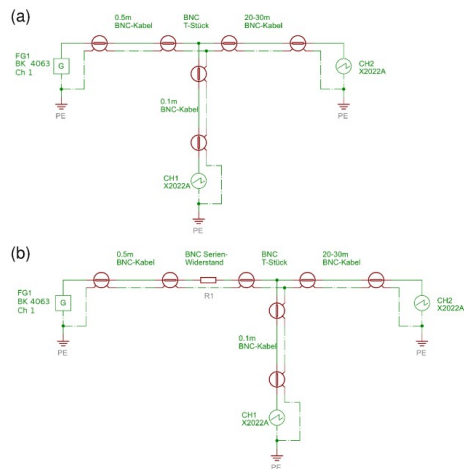


Abb. 1: Schaltplan und realer Aufbau der ersten Aufgabe

3.2 Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz

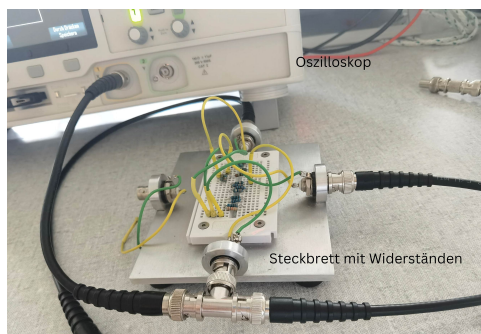
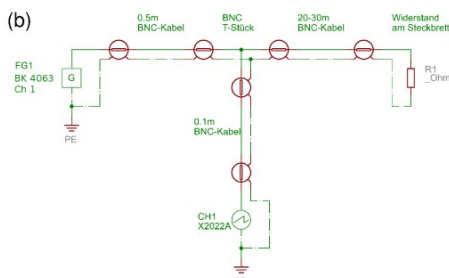


Abb. 2: Schaltplan und realer Aufbau der zweiten Aufgabe

3.3 Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität

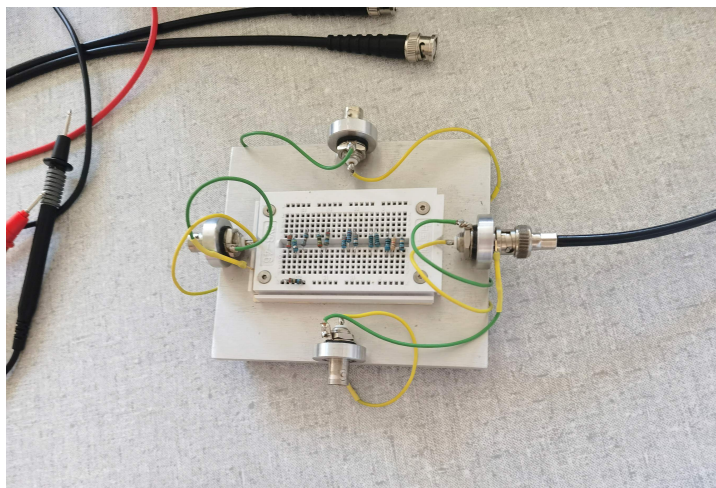
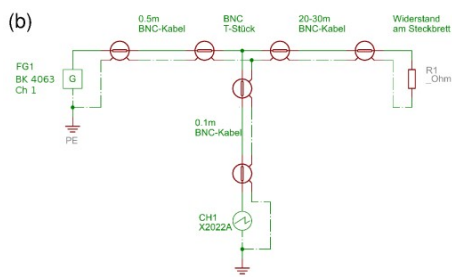


Abb. 3: Schaltplan und Steckbrett mit verschiedenen Abschlusswiderständen

3.4 Verzweiger

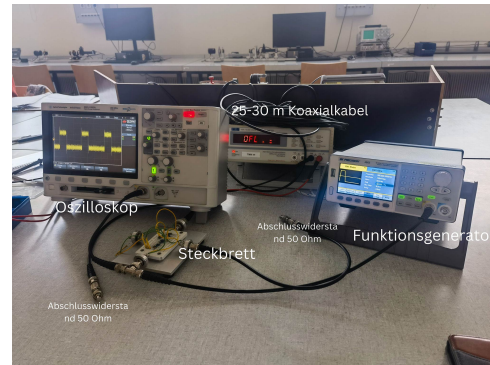
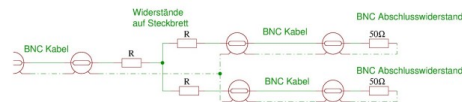


Abb. 4: Schaltplan und realer Aufbau der vierten Aufgabe

4 Geräteliste

Tab. 2: Im Versuch verwendete Geräte und Utensilien.

Gerät	Gerätenummer	Unsicherheit
Oszilloskop	n.a	30 mV
Digitalmultimeter	TTi 1604	1.5 % ± 6 dig
Funktionsgenerator	n.a	n.a
Widerstände	n.a	n.a
BNC-Kabel	n.a	n.a
Abschlusswiderstände	n.a	n.a
Steckbrett	n.a	n.a

5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

5.1 Spannungsverläufe

Bei der ersten Aufgabe wurde zunächst die Schaltung laut 1 umgesetzt. Am Frequenzgenerator wird dann ein rechteckiges Pulssignal mit 300 kHz und einer Pulsdauer von 100 nS (33% Duty) eingestellt. Dieses Signal wird dann über die Schaltung am Oszilloskop dargestellt. Dann wird die Pulsdauer schrittweise bis auf 30% Duty erhöht und die resultierenden Oszigrammen als Bilder gespeichert.

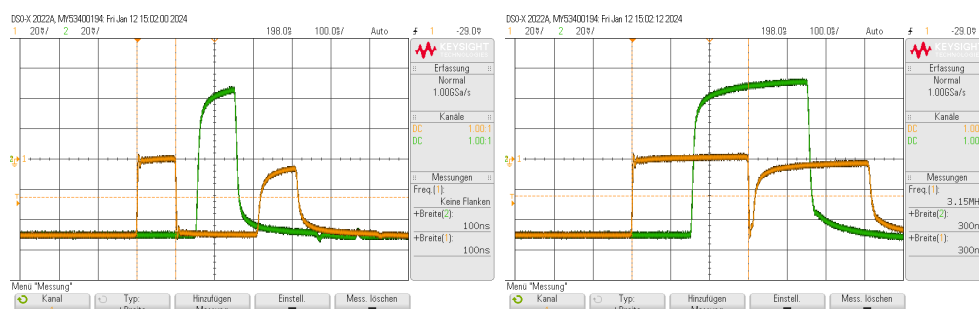


Abb. 5: Resultierende Graphen bei Pulsdauer 100 nS und 300 nS

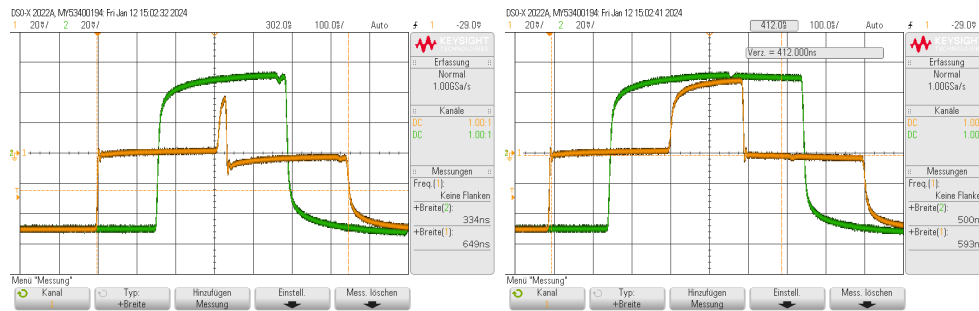


Abb. 6: Resultierende Graphen bei Pulsdauer 335 nS und 500 nS

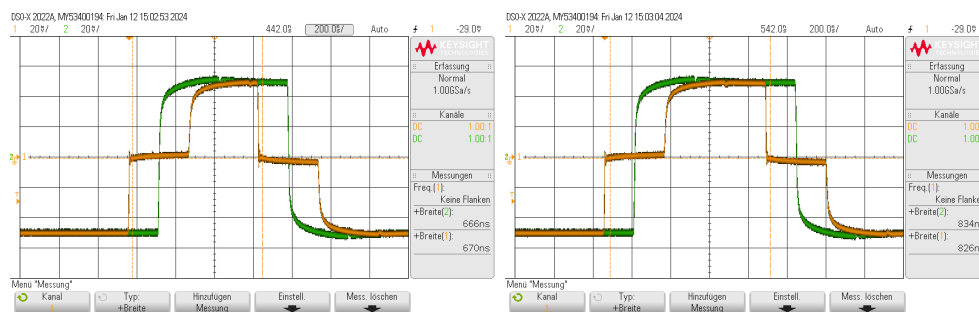


Abb. 7: Resultierende Graphen bei Pulsdauer 666 nS und 834 nS

Dann wird der Innenwiderstand der Signalquelle durch einen seriell angeschlossenen Widerstand erhöht. Die Pulsdauer wird auf $1 \mu\text{s}$ eingestellt und das Oszilloskopbild aufgenommen.

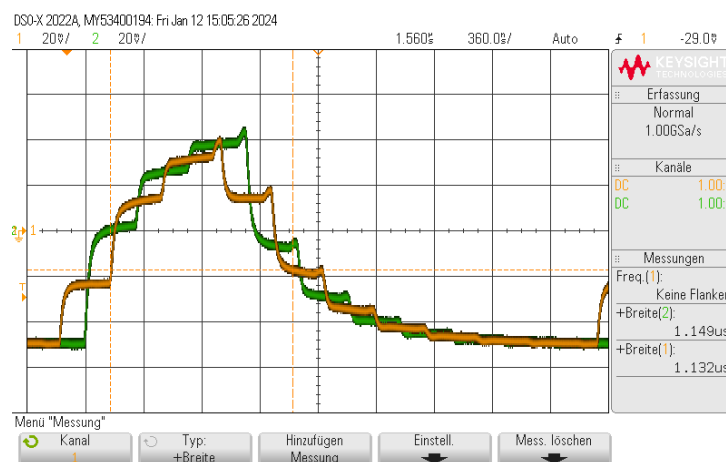


Abb. 8: Resultierende Graphen bei erhöhtem Innenwiderstand

Im Gegensatz dazu wird der Innenwiderstand durch einen parallel geschalteten Widerstand verringert. Auch hier wird wieder ein Oszibild gespeichert.

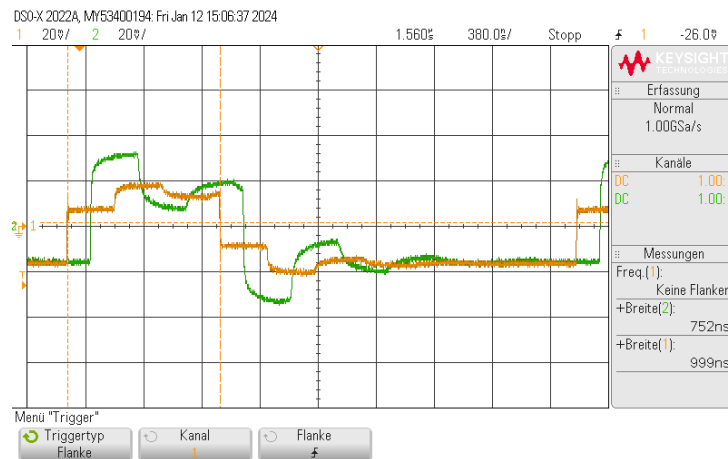


Abb. 9: Resultierende Graphen bei verringertem Innenwiderstand

5.2 Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz

Beim zweiten Teil des Versuches werden die Widerstände des Steckbrettes als Abschlusswiderstände genutzt, um weiters mittels umgebauter Schaltung 2 die Reflexionskoeffizienten für die jeweiligen Widerstände zu bestimmen. Zunächst wurden jedoch die Widerstände am Steckbrett der Reihe nach mit einem Digitalmultimeter vermessen und die resultierenden Werte festgehalten.

Tab. 3: Widerstände am Steckbrett

R / Ω	ΔR
0.676	0.017
0.998	0.021
2.2	0.1
16.1	0.9
16.1	0.9
18.2	0.9
22.1	1.0
33.1	1.1
47.2	1.4
68.6	1.7
100.2	2.2
179	8
330	11

Weiters wurden nun die Spannungen U_E und U_R zur späteren Bestimmung der Reflexionskoeffizienten aufgezeichnet.

Tab. 4: U_E und U_R mit verschiedenen Abschlusswiderständen gemessen

R / Ω	ΔR	$U_E \pm 30$ / mV	$U_R \pm 30$ / mV
0.676	0.017	53	-42
0.998	0.021	54	-43
2.2	0.1	53	-45
16.1	0.9	53	-28
16.1	0.9	53	-28
18.2	0.9	53	-27
22.1	1.0	55	-21
33.1	1.1	53	-17
47.2	1.4	53	-7
68.6	1.7	53	9
100.2	2.2	53	17
179	8	53	27
330	11	54	36

Nun sollen diese Ergebnisse noch jenen mit einem BNC-Abschlusswiderstandes ermittelt und später verglichen werden. Dafür wurde dieser in die Schaltung eingebracht und die beiden Werte für U_E und U_R erneut niedergeschrieben.

Tab. 5: U_E und U_R mit BNC-Abschlusswiderstand gemessen

$U_E \pm 30$ / mV	$U_R \pm 30$ / mV
56	9

5.3 Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität

Für die Auswertung der dritten Aufgabe wurden keine neuen Daten aufgenommen, da diese mit den Werten aus Aufgabe 1 durchgeführt wird.

5.4 Verzweiger

Für den letzten Aufgabenteil wurde die Schaltung gemäß Abbildung 4 umgebaut. Nun gilt es, die richtigen Widerstände am Steckbrett zu finden, damit die Schaltung als Verzweiger funktioniert. Da sich diese im Bereich der BNC-Elemente (50Ω) befinden müssten und es von den ca. 16Ω Widerständen die benötigten zwei gibt, wurde der gesuchte Bereich hier vermutet. Dann werden diese Widerstände am Steckbrett ausprobiert und die Oszilloskopbilder parallel dazu beobachtet. Sobald das reflektierende Signal minimal wird, ist der gesuchte Aufbau gefunden. Resultierend wurden so die beiden $(16.1 \pm 0.9) \Omega$ Widerstände verwendet, um folgendes Oszi-Resultat zu erhalten.

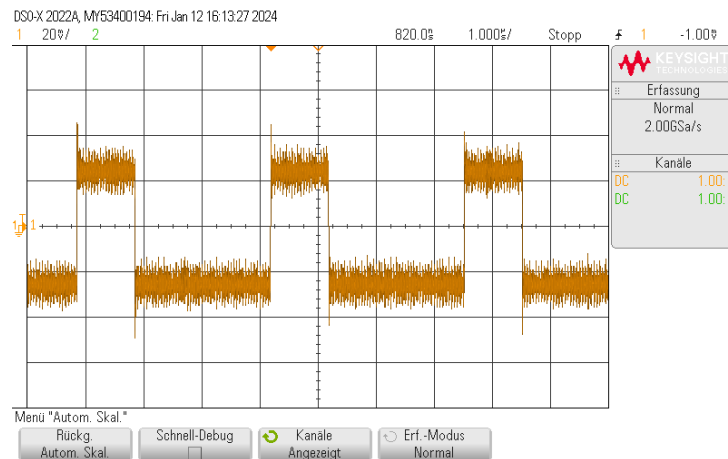


Abb. 10: Resultierende Graphen des Verzweigers

6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse

In der Auswertung werden zur erhöhten Genauigkeit durchgehend ungerundete Werte bis zu den Endergebnissen verwendet und nur zur Darstellung gerundet.

Zur Berechnung der Unsicherheiten wird, wenn nicht anders angegeben, die Größtunsicherheitsmethode verwendet, bei den Graphen werden jedoch für die Unsicherheiten die Standardabweichungen der Mittelwerte herangezogen.

6.1 Spannungsverläufe

Die verschiedenen Spannungsverläufe der jeweiligen Pulsdauern sind in folgender Abbildung zur besseren visualisierung übereinandergestellt.

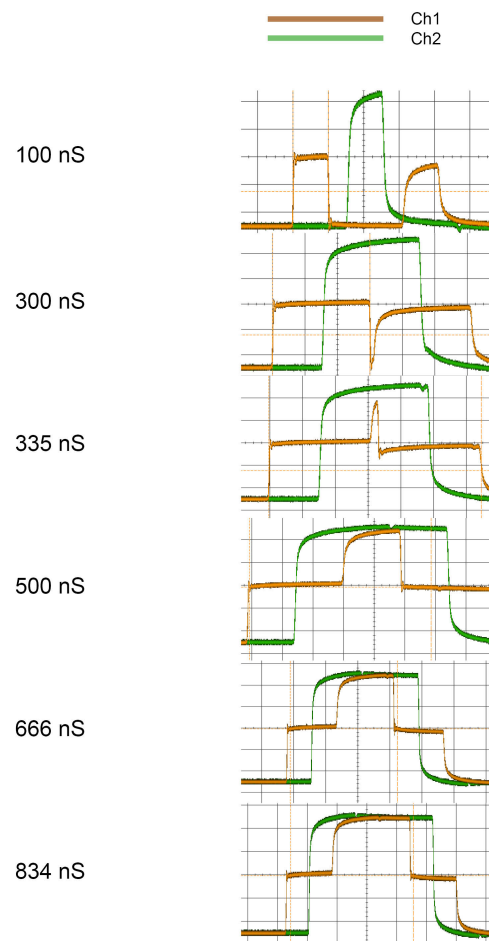


Abb. 11: Spannungsverläufe der jeweiligen Pulsdauern

Zu Beginn bei einer Pulsweite von 100 nS lässt sich erkennen, dass der Spannungspuls am Kabelende auftritt und dort reflektiert wird. Bei einem offenem Leiterende liegt der Reflexionskoeffizient bei 1, weshalb es hier zu einer Spannungsverdopplung kommt. Nach kurzer Zeit kommt der reflektierte Teil auch wieder am Eingang, also dem Kanal 1, an und wird dort detektiert.

Bei etwa 335 nS sieht man am Graphen einen Umschwung zwischen der einlaufenden- und der reflektierten Welle. Hier befindet sich die Grenze, bei der der Puls selbst länger ist, als die Zeit die er hin und zurück benötigt, weshalb sich das Signal hier überlagert. Diese Überlagerung wird mit zunehmender Pulsdauer weiter vergrößert.

In den ermittelten Abbildungen 8 und 9 wurde nun der Innenwiderstand der Signalquelle erhöht bzw. verringert.

Bei erhöhtem Innenwiderstand wird das Signal nun nicht nur noch am Kabelende, sondern auch am eingebundenen Widerstand reflektiert. Dies führt zu einer Addition dieser Widerstände, wodurch die Kabelimpedanz überschritten wird und so ein offenes Kabelende

bilden (positive Reflexionsstelle). Wie in Abbildung 8 zu erkennen, wird das eingehende Signal, sobald es am offenen Ende ankommt, reflektiert. Dies geschieht jedoch erneut, sobald es am Eingang wieder ankommt, was zu einer dreifachen Überlagerung des Signals führt. Durch die Kabelimpedanz und den nicht unendlichen Abschlusswiderstand wiederholt sich dieser Prozess zwar nun fortlaufend, jedoch wird die Spannung jedesmal etwas abgeschwächt.

Mit verringertem Innenwiderstand kommt es zu einem sehr ähnlichen Phänomen. Wie sich in Abbildung 9 sehen lässt, kommt es jedoch zu einem unterschiedlichem Resultat. Dadurch, dass sich am offenen Ende ebenfalls eine positive Reflexion bildet, am Eingang aber eine negative Reflexion auftritt, kommt es zu einem auf- und abschwankendem Signal.

6.2 Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz

Mit den ermittelten Spannungen aus Tabelle 4, eingesetzt in Formel 1, lassen sich die Reflexionskoeffizienten bestimmen.

Tab. 6: Berechnete Reflexionskoeffizienten der jeweiligen Widerstände

R / Ω	$\rho / 1$	$\Delta\rho / 1$
0.676	-0.79	0.11
0.998	-0.80	0.11
2.2	-0.85	0.11
16.1	-0.53	0.11
16.1	-0.53	0.11
18.2	-0.51	0.11
22.1	-0.38	0.10
33.1	-0.32	0.10
47.2	-0.13	0.08
68.6	0.17	0.07
100.2	0.32	0.06
179	0.51	0.06
330	0.67	0.05

Mit den resultierenden Werten lässt sich ein Graph zeichnen, welcher den Reflexionskoeffizienten der einzelnen Abschlusswiderstände aufzeigt (theoretischer Verlauf laut Gleichung 1 in grün).

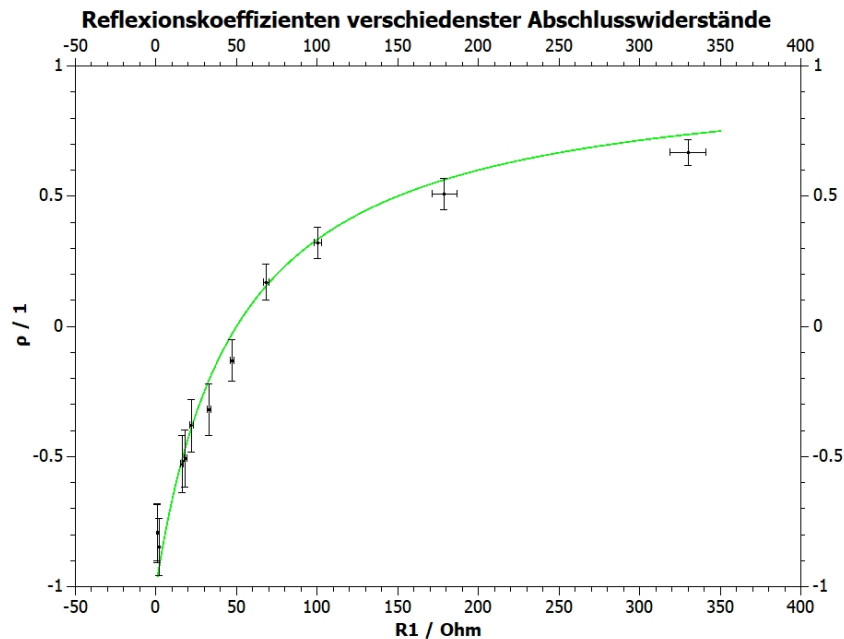


Abb. 12: Reflexionskoeffizienten der verschiedenen Abschlusswiderstände

Durch lineare Interpolation der Messwerte ergibt sich weiters bei $\rho = 0$ die Abschlussimpedanz, und laut Gleichung 1 gleich die Kabelimpedanz von $(56.5 \pm 1.6) \Omega$.

Mit den gemessenen Werten aus Tabelle 5 kann mittels Gleichung 1 der reale Reflexionskoeffizient mit (0.15 ± 0.09) berechnet werden.

6.3 Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität

Mit Hilfe der Daten aus Aufgabe 1 (100 nS Puls Messung) kann die Laufzeit $t = (300 \pm 10) \text{ nS}$ und die Kabellänge $s = (31.1 \pm 0.1) \text{ m}$ bestimmt werden. Mittels Formel 2 ergibt sich die Signalgeschwindigkeit v .

$$v = (207 \cdot 10^6 \pm 8 \cdot 10^6) \text{ m/s}$$

Weiters lässt sich mittels Gleichung 3 die relative Permittivität bestimmen.

$$\epsilon_r = (2.09 \pm 0.13)$$

6.4 Verzweiger

Der Spannungsverlauf des Verteilers wurde am Oszilloskop aufgenommen und ist in Abbildung 10 ersichtlich.

7 Diskussion

7.1 Spannungsverläufe

Die Spannungsverläufe der jeweiligen Pulsdauer entsprechen den theoretischen Erwartungen.

7.2 Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz

Prinzipiell befinden sich die gemessenen Reflexionskoeffizienten im Bereich des theoretischen Verlaufes. Nur bei den höheren Widerstandswerten weichen die Werte leicht von den Erwartungen ab. Dies macht aber weitestgehend auch Sinn, da Verluste z.B. im Kabel nicht miteinbezogen wurden. Die bestimmte Kabelimpedanz von $(56.5 \pm 1.6) \Omega$ kommt dem Literaturwert von 50Ω jedoch sehr nahe, wobei auch hier Verluste eine Rolle spielen.

7.3 Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität

Die Signalgeschwindigkeit, welche im dritten Aufgabenteil bestimmt wurde, liegt zum einen unter der Lichtgeschwindigkeit und im Bereich der 66% der Lichtgeschwindigkeit (wie bei BNC-Tools üblich), was beides für eine korrekte Durchführung spricht. Weiters liegt auch die Permittivität mit (2.09 ± 0.13) , verglichen mit anderen Kunststoffen (z.B. Vinyl: 2.2) in einem realistischen Umfeld.

7.4 Verzweiger

Die experimentell bestimmten Widerstände ergeben gemeinsam einen Impedanzwert von etwa 50Ω und liegen somit ebenfalls in einem denkbaren Bereich.

8 Zusammenfassung

8.1 Spannungsverläufe

Die Spannungsverläufe sind in Abbildung 11 zu erkennen und wurden im Kapitel Auswertung beschrieben.

8.2 Reflexionskoeffizient/Kabelimpedanz

Tab. 7: Berechnete Reflexionskoeffizienten der jeweiligen Widerstände

R / Ω	ρ / 1	$\Delta\rho$ / 1
0.676	-0.79	0.11
0.998	-0.80	0.11
2.2	-0.85	0.11
16.1	-0.53	0.11
16.1	-0.53	0.11
18.2	-0.51	0.11
22.1	-0.38	0.10
33.1	-0.32	0.10
47.2	-0.13	0.08
68.6	0.17	0.07
100.2	0.32	0.06
179	0.51	0.06
330	0.67	0.05

Der dazugehörige Graph ist mitsamt theoretischem Verlauf in Abbildung 12 ersichtlich. Die berechnete Kabelimpedanz und der gemessene Reflexionskoeffizient betragen $(56.5 \pm 1.6) \Omega$ und (0.15 ± 0.09) .

8.3 Signalgeschwindigkeit/relative Permittivität

Die Signalgeschwindigkeit wurde mit $v = (207 \cdot 10^6 \pm 8 \cdot 10^6) \text{ m/s}$ bestimmt, die Permittivität mit $\epsilon_r = (2.09 \pm 0.13)$.

8.4 Verzweiger

Der Verzweiger wurde praktisch realisiert und ein Oszilloskopbild in Abbildung 10 gespeichert.

Literatur

- [1] TU Graz TeachCenter. *"Laborübungen 2: Elektrizität, Magnetismus, Optik". Kurs: PHYD30UF.* (besucht am 12.01.2024). URL: <https://tc.tugraz.at/main/course/view.php?id=796>.
- [2] wikipedia.org. *Abschlusswiderstand.* (besucht am 12.01.2024). URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Eingangswiderstand>.
- [3] wikipedia.org. *Kapazität.* (besucht am 12.01.2024). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Kapazit%C3%A4t.
- [4] wikipedia.org. *Leitungsbeläge.* (besucht am 12.01.2024). URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Leitungsbel%C3%A4ge>.
- [5] wikipedia.org. *Wellenwiderstand.* (besucht am 12.01.2024). URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wellenwiderstand>.