

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: PHYC03UF

Übungstitel: Signalleitung

Betreuer: GRANITZER Petra

Gruppennummer: 1

Name: PHILIPP Maximilian

Name: STARK Matthias

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12004907

Datum der Übung: 15 Oktober

WS 2021/2022

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Aufgabenstellung | 3 |
| 2 | Grundlagen | 3 |
| 3 | Versuchsanordnung | 6 |
| 4 | Geräteliste | 8 |
| 5 | Versuchsdurchführung & Messergebnisse | 8 |
| 5.1 | zeitlicher Spannungsverlauf am Anfang und Ende eines Koaxialkabels . . | 9 |
| 5.1.1 | Variation der Pulsdauer | 9 |
| 5.1.2 | Erhöhung des Innenwiderstands durch Serienwiderstand | 12 |
| 5.1.3 | Erhöhung des Innenwiderstands durch Parallelwiderstand | 13 |
| 5.2 | Reflexionskoeffizient des Kabels und Kabelimpedanz | 14 |
| 5.3 | Signalgeschwindigkeit des Kabels und Permitivität des Isolatormaterials . | 17 |
| 5.4 | Schaltung mit Widerständen | 17 |
| 5.5 | Sinusspannung | 18 |
| 6 | Auswertung | 19 |
| 6.1 | zeitlicher Spannungsverlauf am Anfang und Ende eines Koaxialkabels . | 20 |
| 6.1.1 | Variation der Pulsdauer | 20 |
| 6.1.2 | Erhöhung des Innenwiderstands durch Serienwiderstand | 20 |
| 6.1.3 | Erhöhung des Innenwiderstands durch Parallelwiderstand | 20 |
| 6.2 | Reflexionskoeffizient des Kabels und Kabelimpedanz | 20 |
| 6.3 | Signalgeschwindigkeit des Kabels und Permitivität des Isolatormaterials . | 22 |
| 6.4 | Schaltung mit Widerständen | 23 |
| 6.5 | Sinusspannung | 23 |
| 7 | Diskussion | 23 |
| 7.1 | zeitlicher Spannungsverlauf am Anfang und Ende eines Koaxialkabels . | 23 |
| 7.2 | Reflexionskoeffizient des Kabels und Kabelimpedanz | 23 |
| 7.3 | Signalgeschwindigkeit des Kabels und Permitivität des Isolatormaterials . | 24 |
| 7.4 | Schaltung mit Widerständen | 24 |
| 7.5 | Sinusspannung | 24 |
| 8 | Zusammenfassung | 24 |

1 Aufgabenstellung

- Zunächst soll der zeitliche Spannungsverlauf am Anfang und am Ende eines langen Koaxialkabels für verschiedene angelegte Spannungspulse gemessen und erklärt werden.
- Dann soll der Reflexionskoeffizient des Kabelendes als Funktion des Abschlusswiderstands bestimmt und so die Kabelimpedanz ermittelt werden.
- Weiters soll die Signalgeschwindigkeit im Koaxialkabel bestimmt und so die relative Permittivität des Isolatormaterials des Koaxialkabels bestimmt werden.
- Zuletzt sind die Widerstände für einen passiven symmetrischen Verzweiger zu dimensionieren und die Funktion der Schaltung experimentell zu demonstrieren.
- Als Zusatz wird der erste Punkt für eine Sinusspannung auf einen Frequenzbereich von 0.5 bis 6 MHz wiederholt.

2 Grundlagen

Wenn Wechselstrom durch ein Kabel fließt entsteht ein Hertz'scher Dipol, was große Energieverluste mit sich bringt. Besser eignen sich hier Doppelwellenleitungen, die dies aufgrund eines Phasenversatzes von π und destruktiver Interferenz ausgleichen. Eine noch bessere Alternative bieten Koaxialkabel. Diese können als zylindrische Wellenleiter mit kreisförmigen Querschnitt aufgefasst werden. Wie in der Skizze in Abbildung 1 ersichtlich, besteht ein Koaxialkabel aus einem dünnen Innenleiter mit Radius a und einem Koaxialen Außenleiter mit Radius b . [1]

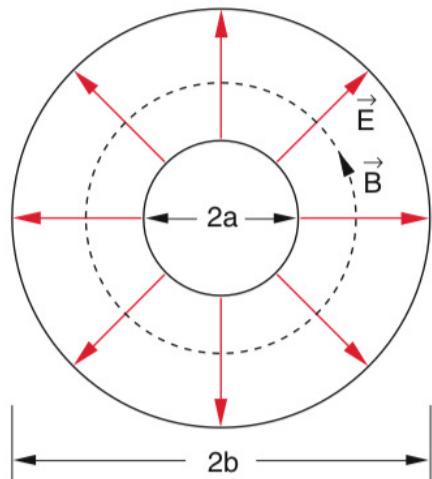


Abbildung 1: Skizze des Aufbaus eines Koaxialkabels [1]

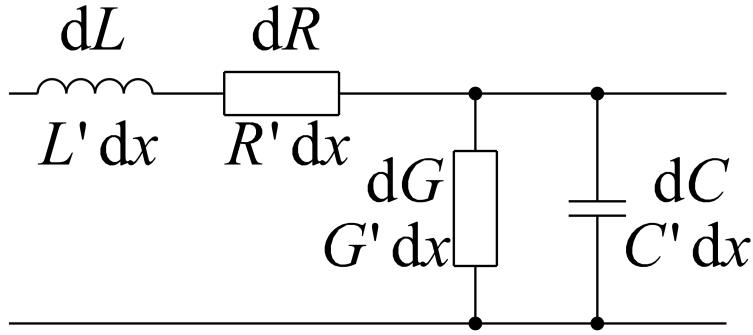


Abbildung 2: Ersatzschaltbild für infinitesimalen kleinen Leiterabschnitt [2]

Ein Leiter kann durch den Leitungswellenwiderstand und den Leitungsbelägen charakterisiert werden. Die Leitungsbeläge beschreiben folgende Eigenschaften des Kabels auf die Kabellänge bezogen:

- Kapazität
- Induktivität
- Widerstandsbelag
- Querleitwert

Der Kapazitätsbelag $[C']_{SI} = \frac{F}{m}$ beschreibt die Kapazität des Leiter pro Länge des Leiter und hängt von der Permittivität ϵ und der Geometrie der Leiteranordnung ab.

Der Induktivitätsbelag $[L']_{SI} = \frac{H}{m}$ beschreibt die Induktivität des Leiter pro Länge des Leiter und hängt von der Permeabilität μ und auch von der Geometrie der Leiteranordnung ab.

Der Widerstandsbelag ist der Widerstand entlang der Leiterrichtung und dessen hier relevante zur Länge relative Größe ist der Widerstandsbelag $[R']_{SI} = \frac{\Omega}{m}$.

Der Querleitwert ist der Leitwert quer zur Leiterrichtung und beschreibt wie viel Verlust durch unvollständige Isolierung zustande kommen. Dessen hier relevante zur Länge relative Größe ist der Ableitungsbelag $[G']_{SI} = \frac{S}{m}$

Jede dieser Größen ist vom Material und der Geometrie des Leiter abhängig.

Unter Verwendung des Induktionsgesetzes erhält man folgende Gleichung 1

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{U(z + \Delta z) - U(z)}{\Delta z} = -L' \frac{dI}{dt} \frac{\partial U}{\partial z} = -L' \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1)$$

Betrachtet man einen infinitesimalen kleinen Leitungsabschnitt kann folgendes Ersatzschaltbild, siehe Abbildung 2, verwendet werden um die Situation genauer zu erläutern

Wenn ein harmonisches Wechselspannungssignal auf das Ende einer Signalleitung trifft, wird dieses Signal, je nach Kabel- und Abschlussimpedanz, teilweise reflektiert und in die Abschlussimpedanz übertragen.

Nun wird folgende Definition des Reflexionskoeffizienten ρ getätigt und die Bedingungen aus den Kirchhoff'schen Regeln aufgestellt. Dabei beschreiben U_r die Amplitude der reflektierten Spannung, U_e die der einfallenden Spannung und U_t die der transmittierten Spannung. Für die Stromstärke gilt dieselbe Notation mit I.

$$\rho = \frac{U_r}{U_e} \quad (2)$$

$$U_t = U_e + U_r \quad (3)$$

$$I_t = I_e - I_r \quad (4)$$

Daraus ergibt sich für die Impedanz des Kabels Z_K und des Anschlusses Z_A folgender Zusammenhang:

$$Z_K = \frac{U_e}{I_e} = \frac{U_r}{I_r} \quad Z_A = \frac{U_t}{I_t} \quad (5)$$

Dies ergibt insgesamt für den Reflexionskoeffizienten ρ : [1]

$$\rho = \frac{Z_A - Z_K}{Z_A + Z_K} \quad (6)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetische Wellen in Materie kann wie folgt berechnet werden, siehe [6]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (7)$$

Wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist, ϵ_r die relative Permittivität und μ_r die Permeabilität des Mediums sind.

3 Versuchsanordnung

Im Rahmen dieses Versuchs wurden verschiedene Schaltungen dimensioniert. Eine jeweilige Skizze des Schaltplans und eine kurze Erklärung finden sich, der besseren Übersicht halber, immer am Anfang des entsprechenden Versuchs im Abschnitt 5.

Um die Signale für die entsprechenden Schaltpläne zu erzeugen und auszuwerten wurden folgende Geräte verwendet.

Es handelt sich dabei um einen Funktionsgenerator, in Abbildung 3 und ein Oszilloskop, siehe Abbildung 4

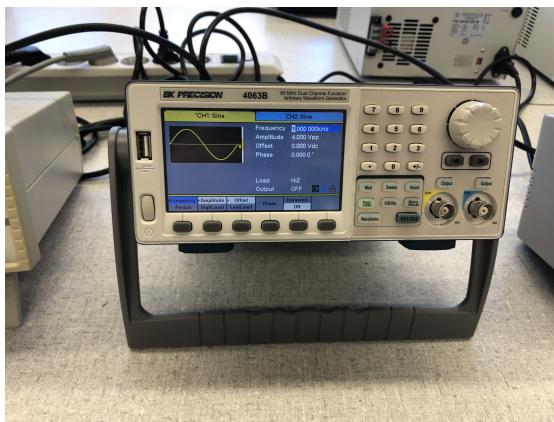


Abbildung 3: Verwendeter Funktionsgenerator

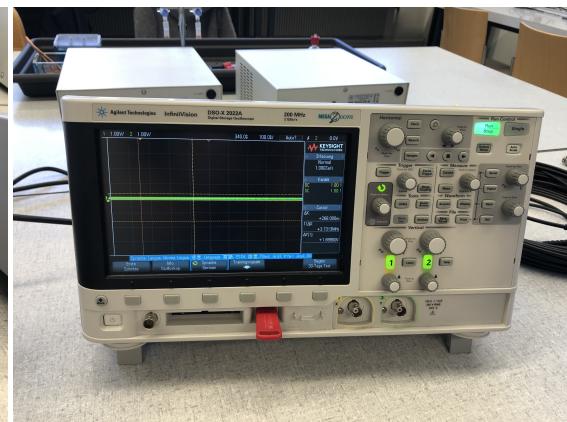


Abbildung 4: Verwendetes Oszilloskop

Um die Schaltungen aufzubauen wurden 3 verschiedene Längen von Koaxialkabeln verwendet, siehe Abbildung 5. Um diese zu verbinden wurden die T-Stücke (3) und Verbindungen (4) aus folgender Abbildung 6 verwendet. Bei (1) handelt es sich um einen BNC Serienwiderstand, bei (2) um einen BNC Parallelwiderstand und bei (5) um zwei Abschlusswiderstände mit jeweils 50Ω



Abbildung 5: Verwendete Kabel



Abbildung 6: Verwendete Stecker und BNC Widerstände

Für den weiteren Versuchsaufbau werden auch normale Widerstände benötigt, die mithilfe des Steckbretts in den Stromkreis eingebunden werden, siehe Abbildung 7. Um den genauen Widerstand dieser zu bestimmen, wird ein digitales Multimeter, Abbildung 8, verwendet.

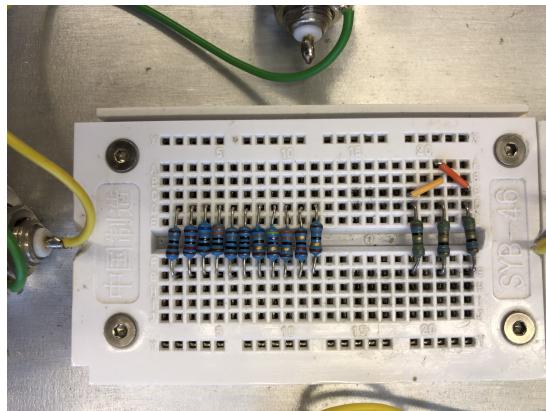


Abbildung 7: Verwendete Widerstände im Steckbrett



Abbildung 8: Verwendetes Multimeter

4 Geräteliste

Für die Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

Tabelle 1: Verwendete Geräte
 Δ ... entsprechende Unsicherheit
 L ... Länge der Kabel

| Gerät | Typ | L | Hersteller | Δ |
|----------------------------|-------------------|--------|----------------------|---------------------|
| Oszilloskop | DSO-X 2022A | | Agilent Technologies | |
| Funktionsgenerator | 4063B | | BK Precision | |
| Multimeter | 401456 | | TTi Aim | |
| Koaxialkabel | RG58 C/U Mil-C-17 | 26,7 m | | 0,1 m |
| 3 Koaxialkabel | RG58 C/U Mil-C-17 | 0,53 m | | 0,01 m |
| Koaxialkabel | RG58 C/U Mil-C-17 | 0,27 m | | 0,01 m |
| BNC Serienwiderstand | | | | |
| BNC Parallelwiderstand | | | | |
| 2 BNC T-Stücke | | | | |
| 2 BNC Abschlusswiderstände | | | | |
| Wiederstände | | | | |
| Steckbrett | SYB - 46 | | | |
| Maßband | UKO2 2628 | | Power-TAPE | 0,005 $\frac{m}{m}$ |

5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

Zunächst wird die Länge der kürzeren Koaxialkabel ermittelt, indem diese mithilfe des Maßbands vermessen werden. Die dadurch erhaltenen Ergebnisse sind, der besseren Übersicht halber, bereits in obiger Tabelle 1 hinzugefügt. Die Unsicherheit der Kabel wurde dabei deutlich höher gewählt als die des Maßbands, aufgrund der Ableseunsicherheit. Die Länge des langen Kabels war, inklusive der entsprechenden Unsicherheit, gegeben.

Für den gesamten Versuchsaufbau wird das Oszilloskop so in den Schaltkreis geschlossen, dass Channel 1 dem Signaleingang, gelbe Kurve, und Channel 2 dem Signalausgang, grüne Kurve entspricht. Weiters wurden die "Volts per Division" auf 1:1 gestellt. Und die "Time per Division" immer anhand des jeweiligen Versuchs angepasst. Die jeweiligen Einstellungen können den entsprechenden Bildern entnommen werden.

5.1 zeitlicher Spannungsverlauf am Anfang und Ende eines Koaxialkabels

5.1.1 Variation der Pulsdauer

Zunächst wird der Stromkreis nach folgenden Schaltplan in Abbildung 9 aufgebaut.

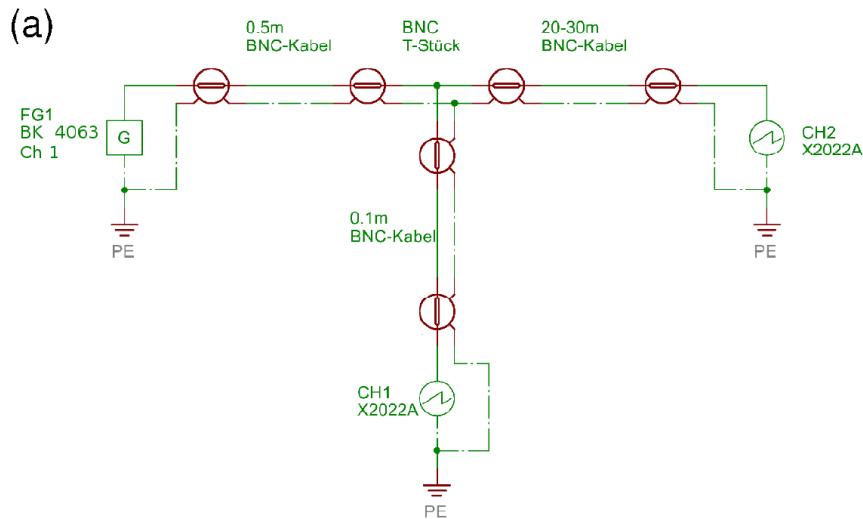


Abbildung 9: Skizze des Schaltplans, der für die erste Aufgabe benötigt wird [4]

Der tatsächliche Aufbau ist in folgender Abbildung 10 sichtbar.

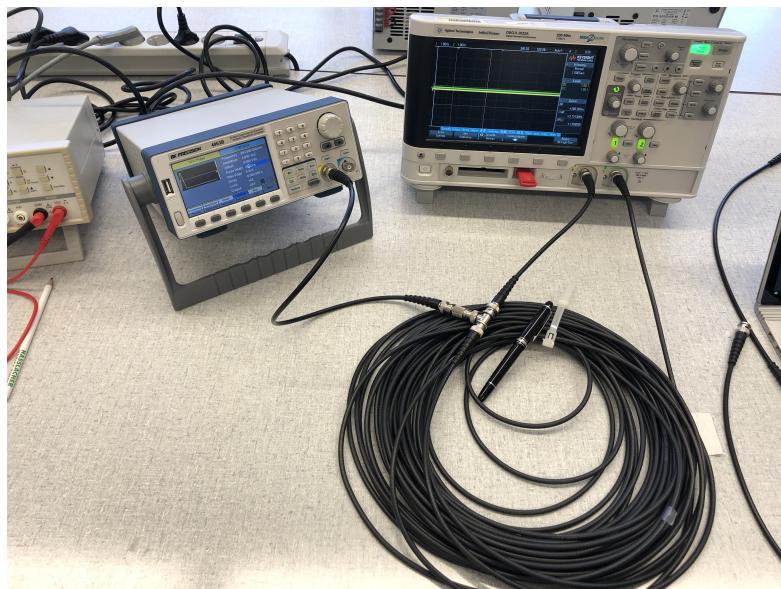


Abbildung 10: Versuchsaufbau für die Messung des Spannungsverlaufs

Zunächst wird mithilfe des Frequenzgenerators ein 300 kHz Signal erzeugt, was mit der Einstellung "Pulse" erreicht wird. Die Pulsdauer wird mithilfe der Funktion "Duty" auf 3

% gestellt, was einer Pulsdauer von 100 ns entspricht. Das vom Oszilloskop aufgezeichnete Bild ist in folgender Abbildung 11 ersichtlich.

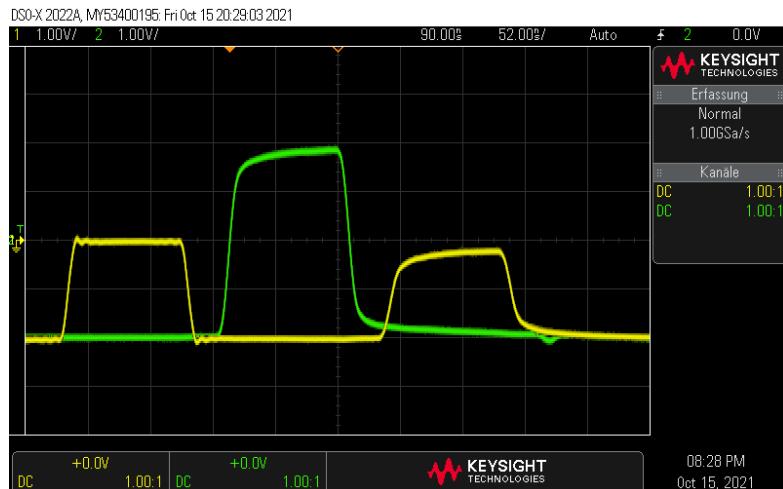


Abbildung 11: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer von 100 ns

Nun werden die Cursor ausgerichtet, um das Ablesen der entsprechenden Werte zu ermöglichen, wie in Abbildung 12 ersichtlich.

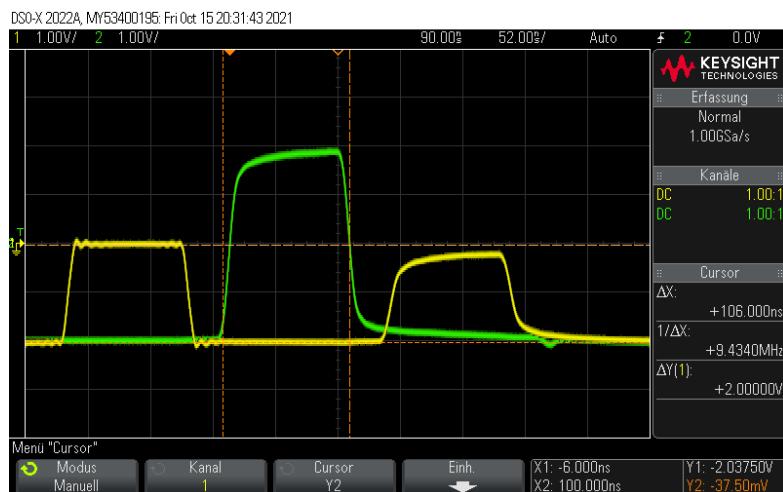


Abbildung 12: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer von 100 ns mit eingestelltem Cursor

Um besser mit den aufgezeichneten Daten arbeiten zu können, werden diese als "CSV-Datei" exportiert und so, gleich wie die ersichtlichen Bilder, direkt vom Oszilloskop auf einen USB-Stick gespeichert.

Nun werden die Pulsdauer, in Form der "Duty" variiert und die entsprechenden Spannungsverläufe in folgenden Abbildungen aufgelistet.

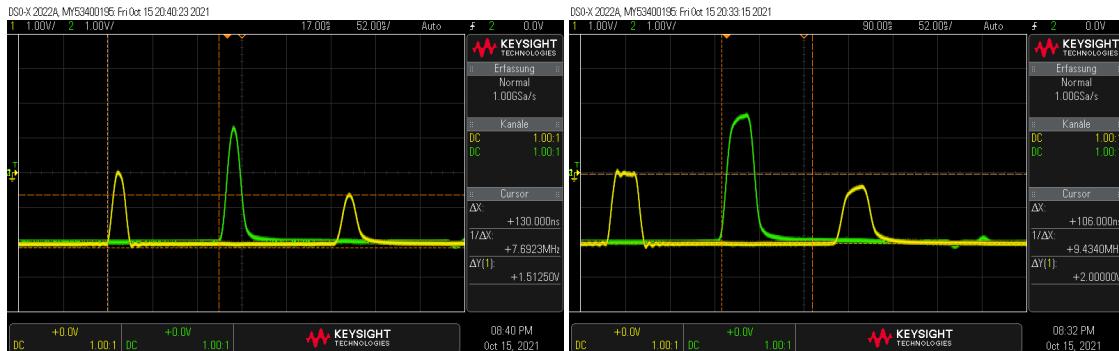


Abbildung 13: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 0.48 %

Abbildung 14: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 1 %

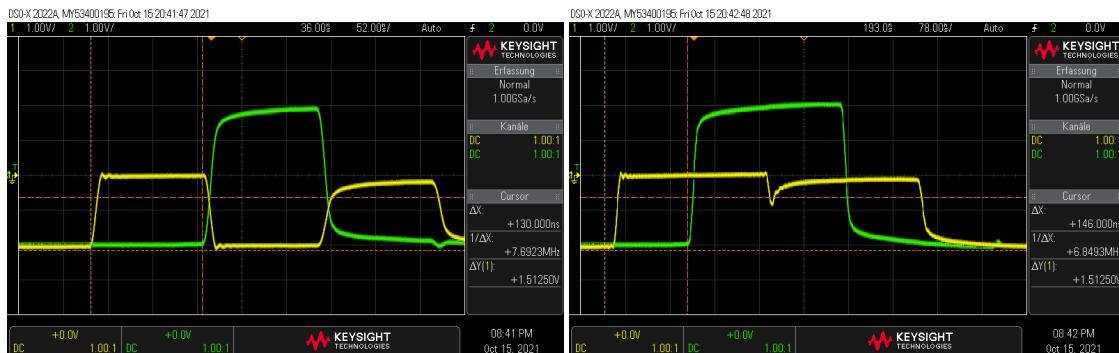


Abbildung 15: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 4 %

Abbildung 16: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 8 %

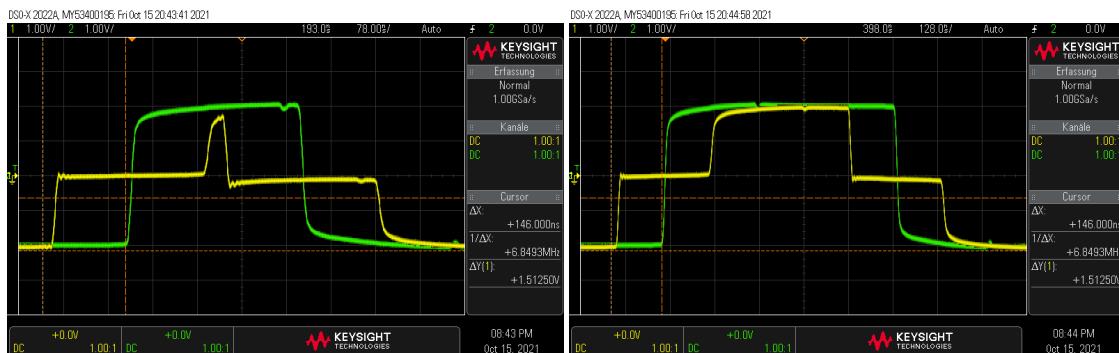


Abbildung 17: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 9 %

Abbildung 18: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 20 %

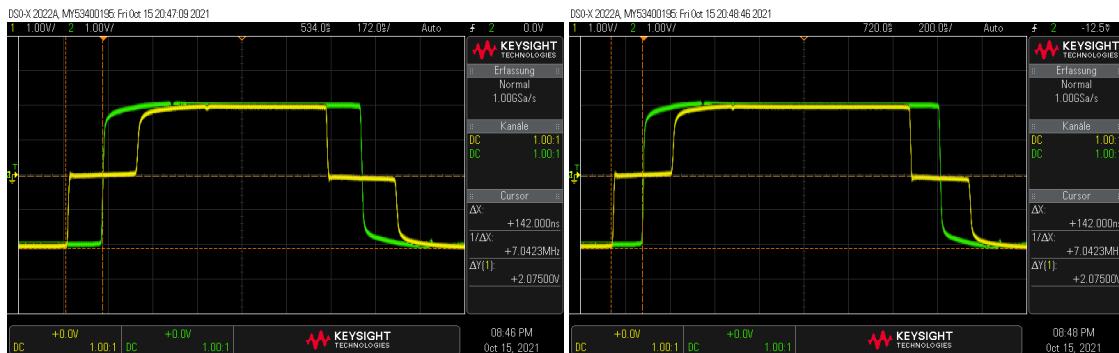


Abbildung 19: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 30 %

Abbildung 20: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 40 %

5.1.2 Erhöhung des Innenwiderstands durch Serienwiderstand

Nun wird der Stromkreis nach folgender Skizze in Abbildung 21 des Schaltplans aufgebaut.

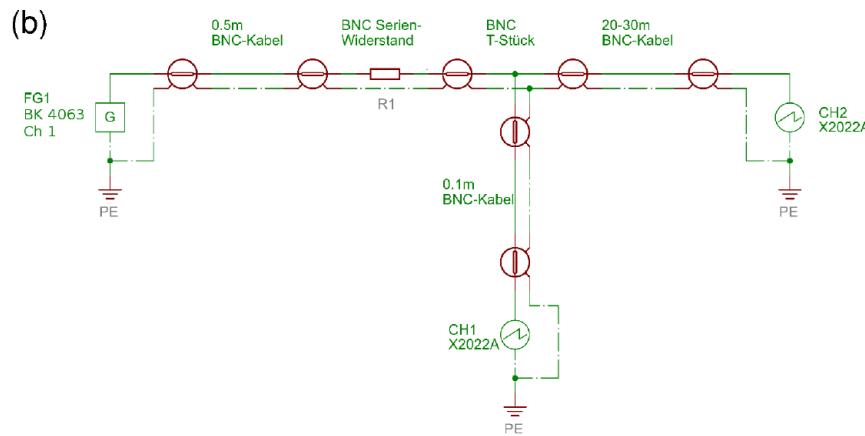


Abbildung 21: Skizze des Schaltplans mit Serienwiderstand [4]

Dazu wird der BNC-Serienwiderstand aus Abbildung 6 verwendet.

Mithilfe des Frequenzgenerators wird wieder ein 300 kHz Signal erzeugt. Für die Pulsdauer wird ein Signal von $1 \mu\text{s}$ verwendet, was einer “Duty“ von 30 % entspricht.

Das so erzeugte Spannungsbild ist in folgender Abbildung 22 zu sehen.



Abbildung 22: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer 1 μ s mit Serienwiderstand

5.1.3 Erhöhung des Innenwiderstands durch Parallelwiderstand

Nun wird der Serienwiderstand durch einen Parallelwiederstand getauscht, sodass folgender Schaltplan aus Abbildung 23 entsteht.

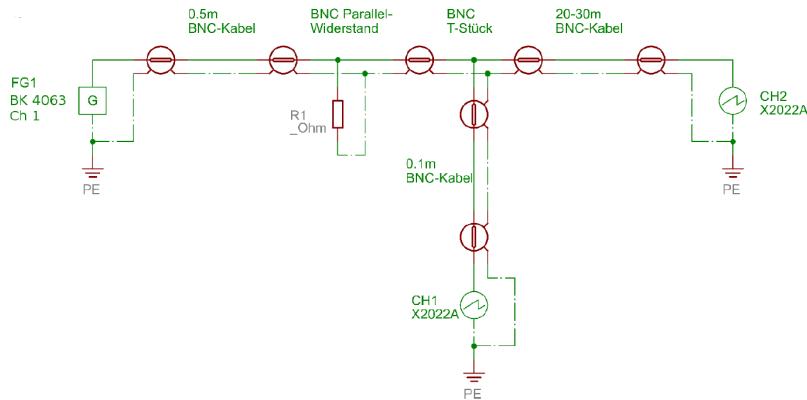


Abbildung 23: Skizze des Schaltplans mit Parallelwiderstand [4]

Dazu wird der BNC-Parallelwiederstand aus Abbildung 6 verwendet.

Das aufgezeichnete Signal des Oszilloskops bei einem 300 kHz Signal erzeugt und einer Pulsdauer von 1 μ s ist in folgender Abbildung 24 ersichtlich.



Abbildung 24: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer 1 μ s mit Parallelwiderstand

5.2 Reflexionskoeffizient des Kabels und Kabelimpedanz

Um den Reflexionskoeffizienten des Kabels zu bestimmen, müssen zunächst die genauen Werte der Widerstände am Steckbrett gemessen werden, da diese nicht mit den angeschriebenen Werten der Widerstände übereinstimmen. Dies geschieht mit dem Multimeter aus Abbildung 8. Der besseren Übersicht halber, werden die erhaltenen Werte erst später in Tabelle 3 aufgelistet.

Der Schaltplan für den Versuchsaufbau ist in folgender Skizze in Abbildung 25 ersichtlich.

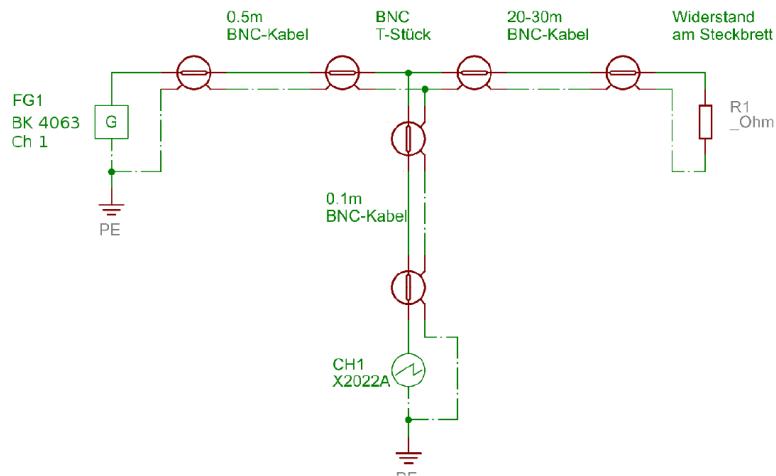


Abbildung 25: Skizze des Schaltplans für den Reflexionskoeffizienten des Kabels [4]

Der tatsächliche Versuchsaufbau ist in folgender Abbildung 26 ersichtlich.

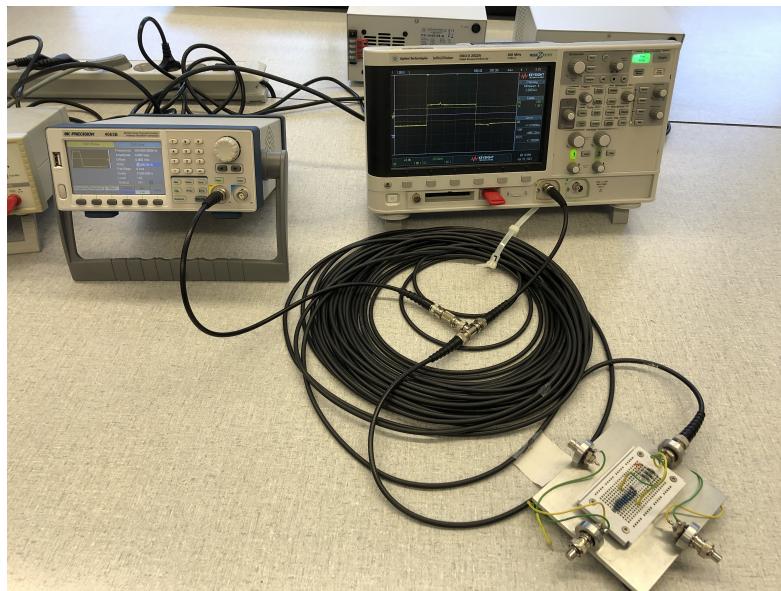


Abbildung 26: Versuchsaufbau für den Reflexionskoeffizienten des Kabels

Dabei ist zu beachten, dass sich im Koaxialkabel sowohl Hin als auch Retourleiter befinden und so die beiden Kabel, die an den Widerstand angeschlossen werden an die gleiche Steckbuchse des Koaxialkabel geführt werden.

Um bessere Werte zu erhalten wurde die Mittlung von 64 "Sample" am Oszilloskop eingeschaltet.

Nun wurde mithilfe der Cursor die Referenzspannung des Signals nach dem ersten "rising edge" gemessen und auch der letzte Spannungswert am letzten Peak, in Abbildung 27 mit 1 markiert, gemessen.

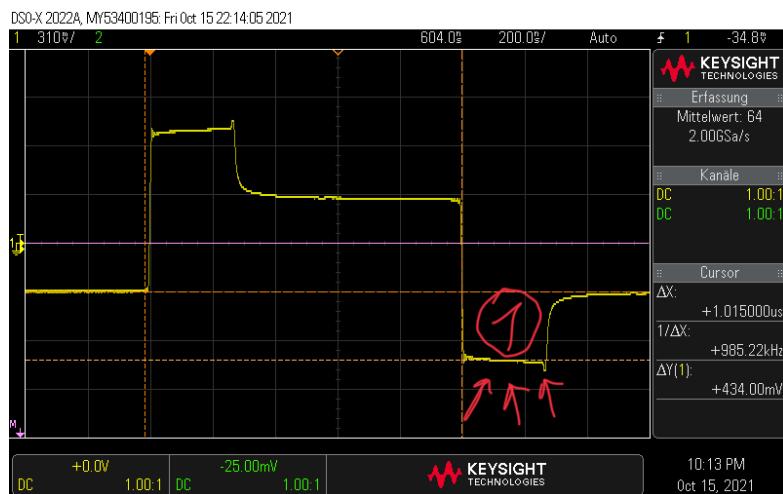


Abbildung 27: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei 300 kHz und einer Pulsdauer 1 μ s für die Messung des Widerstands

Die so erhaltenen Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 2: Abgelesene Werte für die Widerstände

R ... gemessener Widerstand mit dem Multimeter mit entsprechender Unsicherheit

U_e ... gemessene Referenzspannung

U_r ... gemessener Wert für die reflektierte Spannung

| R / Ω | U_e / V | U_r / V |
|------------------|-----------|-----------|
| 1794 ± 17 | 1.019 | 0.937 |
| 1195 ± 12 | 1.019 | 0.903 |
| 677 ± 7 | 1.031 | 0.841 |
| $330,1 \pm 0,6$ | 1.035 | 0.713 |
| $179,5 \pm 0,3$ | 1.027 | 0.539 |
| $100,1 \pm 0,2$ | 1.032 | 0.306 |
| $68,10 \pm 0,16$ | 1.031 | 0.132 |
| $47,12 \pm 0,13$ | 1.027 | -0.051 |
| $33,02 \pm 0,10$ | 1.015 | -0.202 |
| $12,14 \pm 0,08$ | 1.015 | -0.585 |
| $18,04 \pm 0,10$ | 1.027 | -0.434 |

Nun wird der Reflexionskoeffizient bei Verwendung des BNC Abschlusswiderstand bestimmt, was in folgender Abbildung 28 sichtbar ist. Da dieser wie in der Abbildung 28 ersichtlich die Reflexion auslöscht ist der BNC Abschlusswiderstand gleich groß wie die Kabelimpedanz.

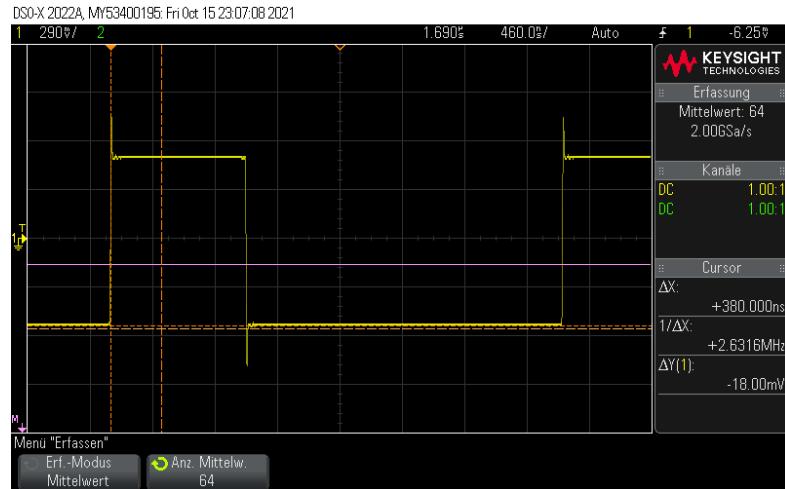


Abbildung 28: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei 300 kHz bei der Verwendung des BNC Abschlusswiderstands

5.3 Signalgeschwindigkeit des Kabels und Permitivität des Isolatormaterials

Um die Signalgeschwindigkeit des Kabels bestimmen zu können, wird die Zeit gemessen vom Signalanfang bis zum Retoursignal gemessen und daraus die Periodendauer T , um die doppelte Länge des Kabels zurückzulegen, bestimmt. Um diese zu bestimmen, wird der Abstand der gelben und grünen Linie in Abbildung 19 bestimmt.

Die gemessene Laufzeit T ist:

$$T = (272 \pm 5) \text{ ns} \quad (8)$$

Die Kabellänge ist in der Geräteliste spezifiziert, siehe Tabelle 1.

5.4 Schaltung mit Widerständen

Nun wird der Schaltplan nach folgender Skizze aus Abbildung 29 aufgebaut.

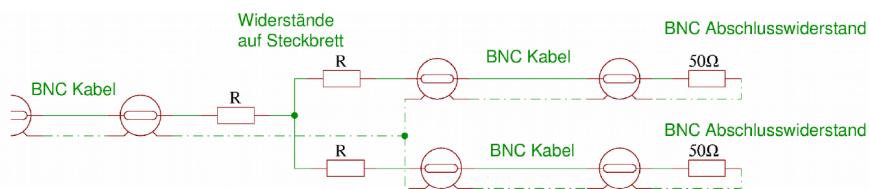


Abbildung 29: Skizze des Schaltplans für die Schaltung mit Widerständen [4]

Der tatsächliche Versuchsaufbau ist in Abbildung 30 ersichtlich.

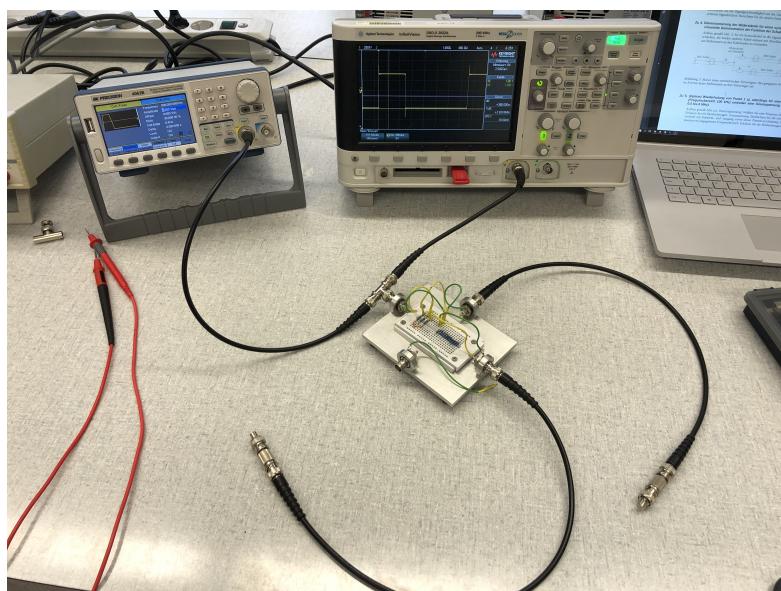


Abbildung 30: Versuchsaufbau für die Schaltung mit Widerständen

5.5 Sinusspannung

Nun wird der Versuch wieder nach den Schaltplan aus Abbildung 9 aufgebaut und eine Sinusspannung mit einer Frequenz von 0,5 MHz angelegt. Das so erzeugte Signal des Oszilloskops ist in folgender Abbildung 31 sichtbar.

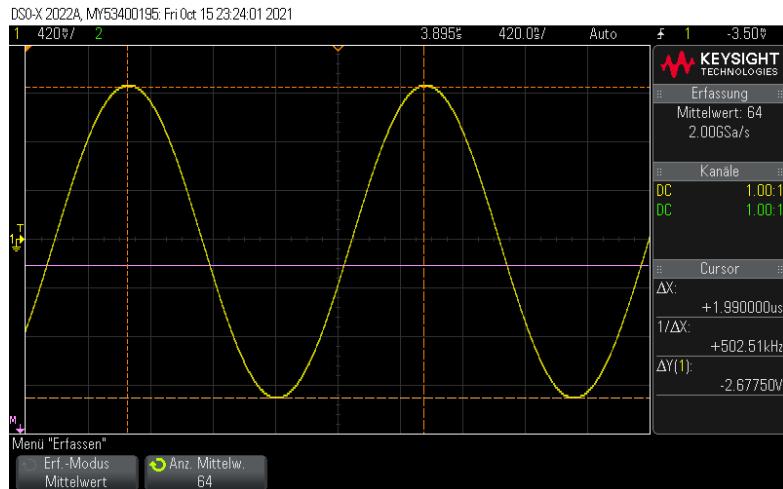


Abbildung 31: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 0,5 MHz Signal

Nun wird die Frequenz erhöht und dadurch folgende Signale erzeugt.

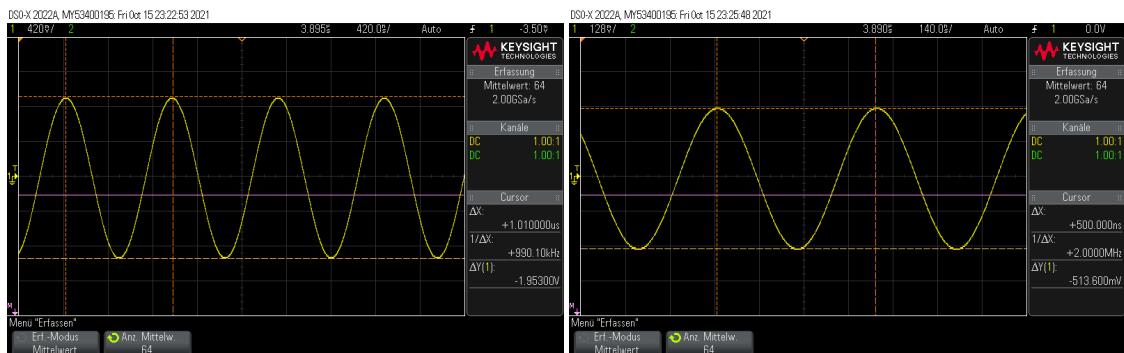


Abbildung 32: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 1 MHz Signal

Abbildung 33: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 2 MHz Signal

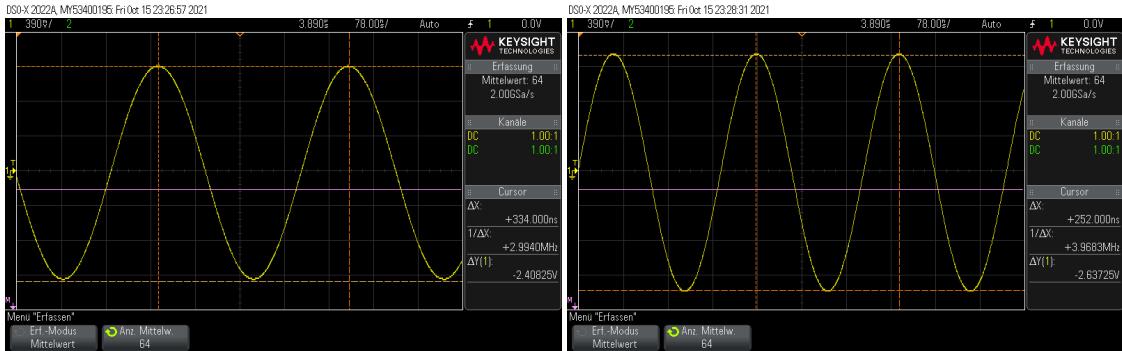


Abbildung 34: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 3 MHz Signal

Abbildung 35: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 4 MHz Signal

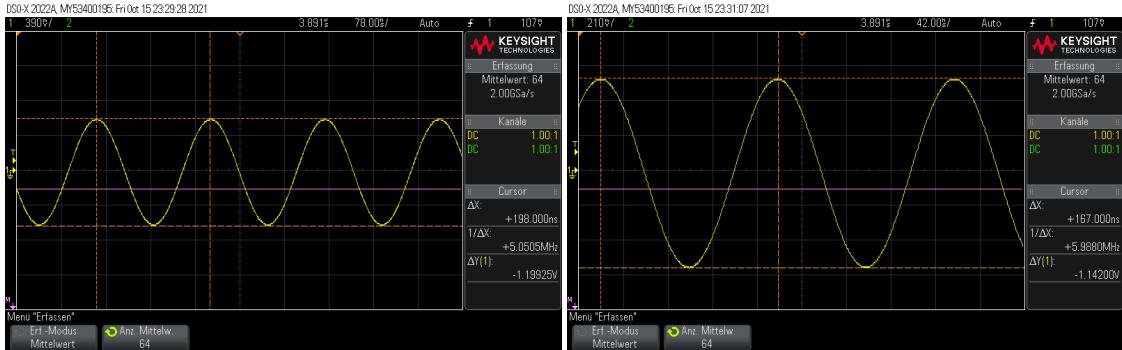


Abbildung 36: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 5 MHz Signal

Abbildung 37: Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 6 MHz Signal

6 Auswertung

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fortplanzt, ist Gleichung 9 verwendet worden. Die Grundlagen dieser Gleichung stammen von den Powerpointfolien von GUM.[8] Die Verallgemeinerung ist von Wikipedia entnommen worden [3]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen das Packet `scipy`, zur Hilfe genommen worden.

$$V_y = J(x) \cdot V_x \cdot J^T(x) \quad (9)$$

Wobei V_y und V_x die Kovarianzmatrizen von den Vektoren \mathbf{y} und \mathbf{x} sind. \mathbf{x} ist der Vektor der Eingangsvariablen und \mathbf{y} ist der Vektor der Ausgangsvariablen. J ist die Jakobimatrix der vektorwertigen Funktion $\mathbf{y} = \vec{F}(\mathbf{x})$. So lassen sich die Komponenten der Matrix relativ einfach anschreiben $J_{ij}(x) = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}(x)$. Damit man die Unsicherheit der einzelnen Variablen y_i bekommt, muss nur die Quadratwurzel des i-ten Diagonalelementes der \mathbf{y} -Kovarianzmatrix genommen werden $u_i = \sqrt{\text{diag}(V_y)_i}$. Da in diesem Experiment meistens

nur skalare Funktionen untersucht werden, vereinfacht sich die Gleichung 9 dramatisch und die Unsicherheit der Variable y lässt sich einfach so berechnen:

$$u_y = \sqrt{\text{grad}y^T \cdot V_x \cdot \text{grad}y} \quad (10)$$

6.1 zeitlicher Spannungsverlauf am Anfang und Ende eines Koaxialkabels

6.1.1 Variation der Pulsdauer

Zunächst sind die Peaks des ausgesendeten und des reflektierten Signals klar getrennt sichtbar. Betrachtet man die entsprechenden Abbildung 16 und Abbildung 17 so stellt man fest, dass genau dazwischen ein Zeitpunkt existiert, bei dem das Sendezeit des Anfangs gesendete Signal genau mit der Umlaufzeit übereinstimmt. Danach überlagern sich die Spannungen der Signale, was in den darauffolgenden Bildern klar ersichtlich ist.

6.1.2 Erhöhung des Innenwiderstands durch Serienwiderstand

Die Erhöhung des Innenwiderstand der Quelle durch Serienschaltung, erlaubt es, dass das Retoursignal nochmal mit einem Reflexionskoeffizienten, der in Intervall von $0 \leq \rho \leq 1$ liegt, reflektiert wird. Das Eingangs und Ausgangssignal überlagern sich mit den Reflexionen. Wenn das Signal aufhört zu senden beginnt das System sich auszuschwingen, wie in Abbildung 22 ersichtlich.

6.1.3 Erhöhung des Innenwiderstands durch Parallelwiderstand

Die Verringerung des Innenwiderstand der Quelle durch Parallelschaltung, erlaubt es, dass das Retoursignal nochmal mit einem Reflexionskoeffizienten, der in Intervall von $-1 \leq \rho \leq 0$ liegt, reflektiert wird. Das Eingangs und Ausgangssignal überlagern sich mit den Reflexionen. Aufgrund des negativen Vorzeichens, findet Signalinversion statt, wodurch das empfangene Retoursignal das sendene Signal abschwächt. Bei schwächerer Verzeichnung werden wieder positive Sprünge sichtbar, bis sich das Signal schließlich im Positiven, beim Eingangssignal, einpendeln würde. Aufgrund des Ausschalten des Signals, fällt dieses ins Negative und pendelt sich schließlich um den Nullpunkt ein, wie in Abbildung 24 ersichtlich.

6.2 Reflexionskoeffizient des Kabels und Kabelimpedanz

Die reflektierten Spannungen werden durch den entsprechenden Wert der Referenzspannung dividiert, wodurch Werte für den Reflexionskoeffizienten ermittelt werden können. Dadurch ergeben sich folgende Werte, siehe Tabelle 3. Die Unsicherheiten sind dabei, wie bereits zuvor erwähnt, mittels Computer ermittelt worden.

Tabelle 3: Werte für die mit Gleichung 2 errechneten Reflexionskoeffizienten ρ

| | ρ | $\Delta\rho$ |
|----|--------|--------------|
| 0 | 0.92 | 0.05 |
| 1 | 0.89 | 0.05 |
| 2 | 0.82 | 0.05 |
| 3 | 0.69 | 0.05 |
| 4 | 0.52 | 0.04 |
| 5 | 0.30 | 0.04 |
| 6 | 0.13 | 0.03 |
| 7 | -0.05 | 0.03 |
| 8 | -0.20 | 0.03 |
| 9 | -0.58 | 0.04 |
| 10 | -0.42 | 0.04 |

Die so erhaltenen Daten werden nun an der theoretischen Kurve, siehe Gleichung 6, gefittet, wodurch folgender Plot entsteht.

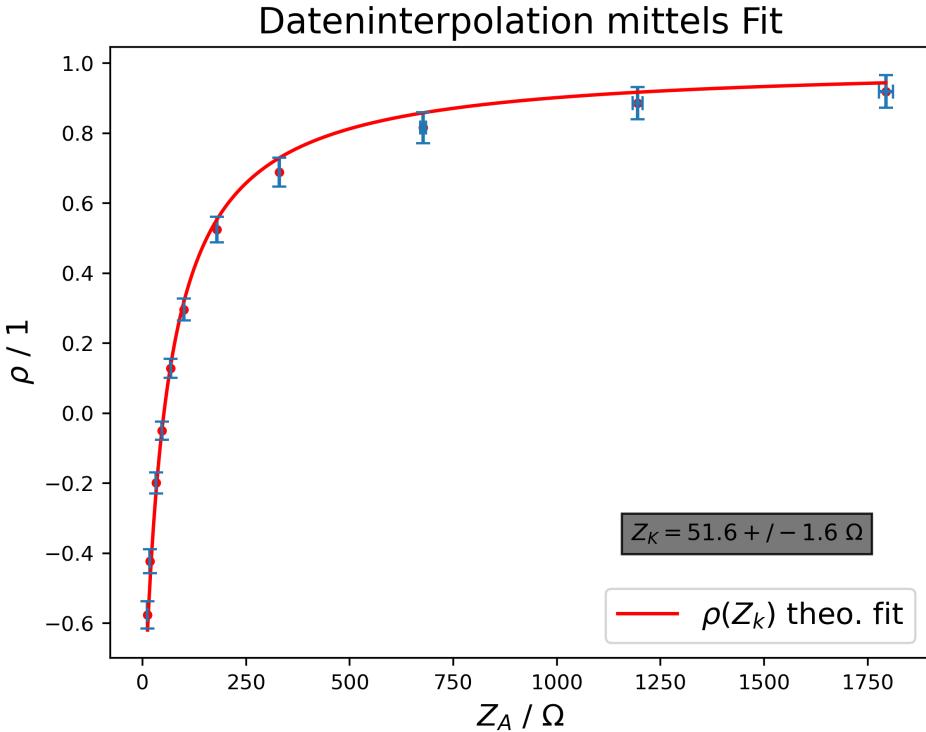


Abbildung 38: Gemessene Werte für den Reflexionskoeffizienten ρ gegen den Anschlusswiderstand Z_A geplottet und an die theoretische Kurve gefittet um die unbekannte Kabelimpedanz Z_K zu bestimmen.

Indem die Kurve durch Non-Linear Fit Methoden gefittet worden ist und Z_K als Fitparameter genommen worden ist folgender Wert, wie in Abbildung 38, ermittelt worden:

$$Z_K = (51,6 \pm 1,6) \Omega \quad (11)$$

Eine andere Methode wäre gewesen den Nullpunkt mittels linearen Interpolation zwischen dem Wert, der gerade ober 0 ist, und dem Wert, der gerade unter 0 ist, zu machen. Da in diesem Punkt gerade der Reflexionskoeffizient 0 ist gilt folgende Gleichung 12:

$$Z_K = Z_A \quad \text{wobei } \rho = 0 \quad (12)$$

6.3 Signalgeschwindigkeit des Kabels und Permitivität des Isolatormaterials

Anhand der gemessenen Umlaufzeit T und der Länge des Kabels l erhält man dadurch die Geschwindigkeit der Kabels, was folgende Werte liefert.

$$v_{\text{Signal}} = \frac{2l}{T} = \frac{226,7 \pm 0,1}{(272 \pm 5) \cdot 10^{-9}} \frac{\text{m}}{\text{s}} = (1,96 \pm 0,05) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (13)$$

Verwendet man nun die so gefundene Signalgeschwindigkeit mit der Gleichung 7 und formt auf ε_r um, kann die Permitivität des Isolatormaterial bestimmt werden, da es ein Dielektrikum ist und daher eine relative Permiabilität von $\mu_r = 1$ hat.

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{v_{\text{Signal}}} \right)^2 = (2,33 \pm 0,11) \frac{\text{F}}{\text{m}} \quad (14)$$

6.4 Schaltung mit Widerständen

Aufgrund des Aufbaue ist, wie im Diagramm ersichtlich, dass die Widerstände richtig gewählt worden sind, sodass keine Reflexion möglich ist und dadurch die Signalintegrität verbessert wird und dadurch maximale Leistungsübertragung stattfindet. Durch diese Widerstände wird daher der ideale Aufbau für eine Signalquelle und 2 Empfänger repräsentiert. Bei einer Änderung der Länge des Kabels oder Widerstände am Kabelende müsste der jeweils andere Parameter angepasst werden.

6.5 Sinusspannung

Der Verlauf der Sinusspannung, kann mit der Mechanik einer stehenden Welle verglichen werden. Dies ist daran erkennbar, dass mit zunehmender Frequenz die Amplituden sowohl anwachsen als auch schrumpfen. Dies ist aufgrund von destruktiver Interferenz erklärbar. Theoretisch hätte man so mit der richtigen Frequenz die totale Auslöschung erreichen können.

7 Diskussion

7.1 zeitlicher Spannungsverlauf am Anfang und Ende eines Koaxialkabels

Wie erwartet wurde, konnte anhand des Versuchs festgestellt werden, dass eine Erhöhung der "Duty" ab einem gewissen Zeitpunkt, bei dem die Sendezeit größer als die Umlaufzeit wird, eine Überlagerung der Signale hervorruft. Weiters wird auch sichtbar, dass erhöhtem Quellenwiderstand, Serienschaltung des Widerstands, nun auch Reflexionen mit positivem Reflexionskoeffizienten und bei einer Verringerung des Quellenwiderstand, Parallelschaltung des Widerstands, negative Reflexionskoeffizienten, stattfinden. Es ist auch ersichtlich, dass bei einem größeren Kabelwiderstand als Abschlusswiderstand ein negativer Reflexionskoeffizient und dadurch eine Signalinversion stattfindet, gemäß Gleichung 6.

7.2 Reflexionskoeffizient des Kabels und Kabelimpedanz

Der ermittelte Wert entspricht genau dem Wert, der den Standards entsprechen würde. Dieser liegt für Kabel vom Typ RG58 C/U MIL-C-17 bei $(50 \pm 2) \Omega$ [7]. Unser Wert stimmt mit dem vom Standard vorgeschriebenen Wert überein:

$$Z_K = (51,6 \pm 1,6) \Omega \quad (15)$$

7.3 Signalgeschwindigkeit des Kabels und Permittivität des Isolatormaterials

Der Wert für die Permitivität eines Dielektrikums (LDPE) liegt bei einer Frequenz von 300 kHz im Intervall von $2,25 \frac{F}{m}$ bis $2,33 \frac{F}{m}$ [5]. Unser erhaltene Wert liegt genau in dem Intervall.

$$\varepsilon_r = (2,33 \pm 0,11) \frac{F}{m}$$

7.4 Schaltung mit Widerständen

Der gewählte Aufbau repräsentiert ein richtig ausbalanciertes System für Signalübertragung, damit so wenig Signalverlust, wie nur möglich, stattfindet. Es wird mehr Leistung übertragen, weil die Reflexionen minimiert wurden, und je mehr Leistung übertragen wird desto klarer wird das übertragene Signal. Dass, keine Reflexion stattfindet sieht man in Abbildung 30.

7.5 Sinusspannung

Als Verbesserungsvorschlag hätte sich für diesen Teil des Versuchs mehr Zeit genommen werden müssen und die genauen Frequenzen bestimmt werden, bei denen ein Maximum der destruktiven Interferenz stattfindet.

8 Zusammenfassung

Die erhaltenen Spannungsdiagramme vom Oszilloskop zeigen das zu erwartende Verhalten bei verschiedenen Reflexionsarten, wenn die Kabelimpedanz größer (negativer Reflexionskoeffizient), kleiner (positiver Reflexionskoeffizient) und gleich (keine Reflexion) dem Abschlusswiderstand ist.

Der erhaltene Wert für die Kabelimpedanz $Z_K = (51,6 \pm 1,6) \Omega$ entspricht dem Standard [7].

Weiters entspricht die Permitivität $\varepsilon_r = (2,33 \pm 0,11) \frac{F}{m}$ von LDPE auch dem Literaturwert von $2,25 \frac{F}{m}$ bis $2,33 \frac{F}{m}$ [5] bei einer Frequenz von 300 kHz.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik. 2: Elektrizität und Optik.* ger. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Springer-Lehrbuch. OCLC: 840599854. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2013. ISBN: 9783642299445 9783642299438.
- [2] *Ersatzschaltbild eines Leitungsabschnitts.* de. Page Version ID: 214445551. Aug. 2021. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wellenwiderstand&oldid=214445551> (besucht am 20.10.2021).
- [3] *Fehlerfortpflanzung.* de. Page Version ID: 205827844. Nov. 2020. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Fehlerfortpflanzung&oldid=205827844> (besucht am 08.05.2021).
- [4] Andreas Hohenau. *Signalleitung.* de. Version 25.08.2016. Universitätsplatz 5/I, 8010 Graz, Karl-Franzens Universität Graz, 25. Okt. 2016.
- [5] Nurul Ismail und Mariatti Jaafar. „A review of thermoplastic elastomeric nanocomposites for high voltage insulation applications“. In: *Polymer Engineering Science* 58 (Feb. 2018). doi: 10.1002/pen.24822.
- [6] Dieter Meschede. *Gerthsen Physik.* Springer-Verlag GmbH, 27. Feb. 2015. 1052 S. ISBN: 9783662459775. URL: https://www.ebook.de/de/product/25604544/dieter_meschede_gerthsen_physik.html.
- [7] *MIL-DTL-17/227. Cable, Radio Frequency, Flexible, Coaxial, 50 OHMS, Low Smoke, Low Loss Diameter 1.200.* Techn. Ber. URL: <https://publishers.standardstech.com/content/military-dod-mil-dtl-17-227>.
- [8] Braunschweig Wolfgang Kessel. *Die ISO/BIPM-GUM Sicht: Schätzwert & Messunsicherheit.* 2004.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Skizze des Aufbaus eines Koaxialkabels [1] | 3 |
| 2 | Ersatzschaltbild für infinitesimalen kleinen Leiterabschnitt [2] | 4 |
| 3 | Verwendeter Funktionsgenerator | 6 |
| 4 | Verwendetes Oszilloskop | 6 |
| 5 | Verwendete Kabel | 6 |
| 6 | Verwendete Stecker und BNC Widerstände | 6 |
| 7 | Verwendete Widerstände im Steckbrett | 7 |
| 8 | Verwendetes Multimeter | 7 |
| 9 | Skizze des Schaltplans, der für die erste Aufgabe benötigt wird [4] | 9 |
| 10 | Versuchsaufbau für die Messung des Spannungsverlaufs | 9 |
| 11 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer von 100 ns | 10 |
| 12 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer von 100 ns mit eingestelltem Cursor | 10 |
| 13 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer “Duty“ von 0.48 % | 11 |

| | | |
|----|---|----|
| 14 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 1 % | 11 |
| 15 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 4 % | 11 |
| 16 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 8 % | 11 |
| 17 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 9 % | 11 |
| 18 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 20 % | 11 |
| 19 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 30 % | 12 |
| 20 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer "Duty" von 40 % | 12 |
| 21 | Skizze des Schaltplans mit Serienwiderstand [4] | 12 |
| 22 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer 1 μ s mit Serienwiderstand | 13 |
| 23 | Skizze des Schaltplans mit Parallelwiderstand [4] | 13 |
| 24 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einem 300 kHz Signal und einer Pulsdauer 1 μ s mit Parallelwiderstand | 14 |
| 25 | Skizze des Schaltplans für den Reflexionskoeffizient des Kabels [4] | 14 |
| 26 | Versuchsaufbau für den Reflexionskoeffizient des Kabels | 15 |
| 27 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei 300 kHz und einer Pulsdauer 1 μ s für die Messung des Widerstands | 15 |
| 28 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei 300 kHz bei der Verwendung des BNC Abschlusswiderstands | 16 |
| 29 | Skizze des Schaltplans für die Schaltung mit Widerständen [4] | 17 |
| 30 | Versuchsaufbau für die Schaltung mit Widerständen | 17 |
| 31 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 0,5 MHz Signal | 18 |
| 32 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 1 MHz Signal | 18 |
| 33 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 2 MHz Signal | 18 |
| 34 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 3 MHz Signal | 19 |
| 35 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 4 MHz Signal | 19 |
| 36 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 5 MHz Signal | 19 |
| 37 | Vom Oszilloskop aufgezeichnetes Signal bei einer Sinusspannung und einem 6 MHz Signal | 19 |
| 38 | Gemessene Werte für den Reflexionskoeffizienten ρ gegen den Anschlusswiderstand Z_A geplottet und an die theoretische Kurve gefittet um die unbekannte Kabelimpedanz Z_K zu bestimmen. | 22 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Verwendete Geräte $\Delta \dots$ entsprechende Unsicherheit $L \dots$ Länge der Kabel | 8 |
| 2 | Abgelesene Werte für die Widerstände $R \dots$ gemessener Widerstand mit dem Multimeter mit entsprechender Unsicherheit $U_e \dots$ gemessene Referenzspannung $U_r \dots$ gemessener Wert für die reflektierte Spannung | 16 |
| 3 | Werte für die mit Gleichung 2 errechneten Reflexionskoeffizienten ρ | 21 |