

Signalleitung

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.
5. (Option) Wiederholung von Punkt 1 a), allerdings für eine Sinusspannung (Frequenzbereich 0.5 bis 6 MHz) und/oder eine Dreieckspannung (Frequenzbereich 100 kHz).

Vorbereitung

Diese Übung soll ein grundlegendes Verständnis für die Leitung und Messung hochfrequenter Signale vermitteln. Von Bedeutung ist dies beispielsweise bei Einzelphotonen-Zählungen oder bei digitalen Datenübertragungen.

Grundlagen

- Beschreibung der Funktionsweise von Koaxialkabeln und Herleitung der Wellengleichung auf Signalleitungen. Siehe z.B. Demtröder, *Experimentalphysik* 2, 4. oder 5. Auflage, Kap. 7.9.3. (b): Koaxialkabel (4. Auflage S. 212, 5 Auflage S. 216)
- Begriff: Leitungsbeläge, Kapazitätsbelag, Induktivitätsbelag, Längswiderstand, Querleitwert. Siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Leitungsbeläge>
- Zeigen Sie, dass sich für $\mu=1$ aus der Phasengeschwindigkeit die relative dielektrische Permittivität des Isolatormaterials des Koaxialkabels bestimmen lässt (aus Gl. 7.60, der Definition von Z_0 und Gl. 7.61 in Kapitel 7 in Demtröder, *Experimentalphysik* 2, 4. oder 5. Auflage.)

Anmerkung: Die Begriffe *Wellenwiderstand des Koaxialkabels* und *Kabelimpedanz* werden synonym verwendet!

Reflexion am Kabelende

Trifft ein harmonisches Wechselspannungs-Signal auf das Ende der Signalleitung (Kabel), wird je nach Impedanzen des Kabels und des Kabel-Abschlusses (z.B. ein anderes Kabel oder die Eingangsimpedanz eines Verstärkers etc.), ein Teil des Signales reflektiert und ein Teil in die Abschluss-Impedanz übertragen. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein (begründen Sie das mit den Kirchhoff'schen Regeln):

$$U_e + U_r = U_t \quad [1]$$

$$I_e - I_r = I_t \quad [2]$$

U_e, I_e sind die (komplexwertigen) Amplituden der Spannung und des Stromes des „einfallenden“ Signals, U_r, I_r jene des „reflektierten“ und U_t, I_t die des „transmittierten“ Signales, das in die Abschlussimpedanz übertragen wird.

Mit der Definition des (komplexwertigen) Reflexionskoeffizienten

$$\rho = \frac{U_r}{U_e} \quad [3]$$

und dem durch die Impedanzen des Kabels (Z_k) und des Abschlusses (Z_A) gegebenen Zusammenhang zwischen Signalspannung und -strom,

$$\frac{U_e}{I_e} = \frac{U_r}{I_r} = Z_k \quad [4]$$

$$\frac{U_t}{I_t} = Z_A \quad [5]$$

ergibt sich der Reflexionskoeffizient:

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

[6]

Im Allgemeinen sind die Impedanzen Z_K und Z_A frequenzabhängig und nicht harmonische Signale werden bei der Reflexion und Übertragung „verzerrt“, da ihre Fourier-Komponenten (bzw. Frequenzanteile) mit verschiedenen Amplituden und Phasen reflektiert werden. Nur im Falle rein reeller, frequenzunabhängiger (also Ohm'scher) Kabelimpedanz und Abschlussimpedanz wird auch ρ reell und frequenzunabhängig. Gl.6 gilt dann nicht nur für harmonische Signale sondern für jede Signalform (z.B auch Rechtecksignale).

Reflexion einer Spannungsstufe am offenen Ende

Abbildung 1 skizziert die Reflexion einer bei $x=0$ (Kabeleingang) zum Zeitpunkt $t=0$ eingespeiste Spannungsstufe, am offenen Kabelende eines Koaxialkabels mit dem Reflexionskoeffizienten $\rho=1$.

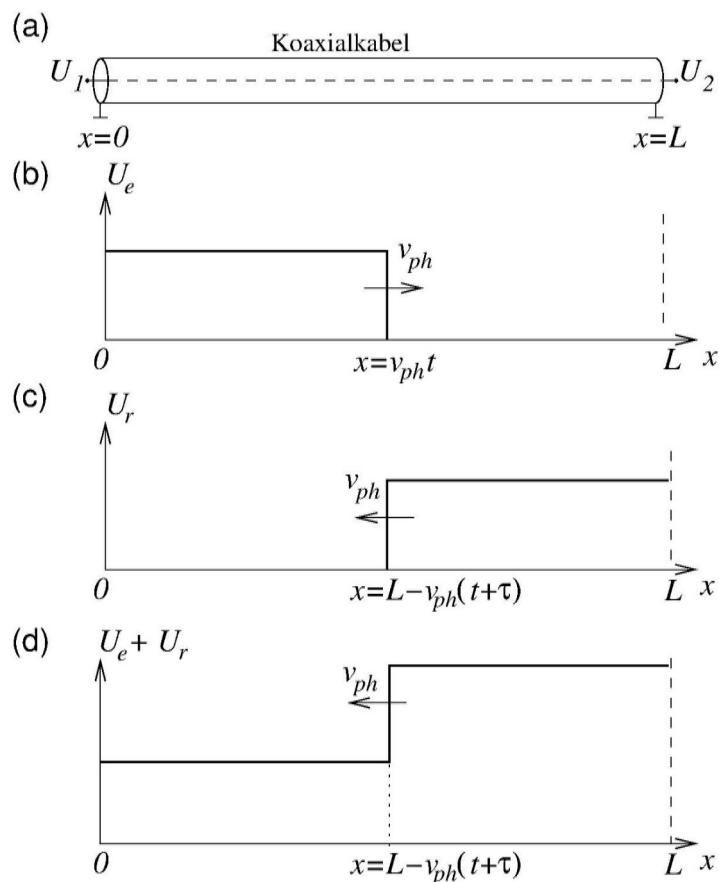


Abbildung 1: (a) Skizze eines Koaxialkabels mit offenem Ende, an dessen Eingang (U_1) eine Spannungsstufe eingespeist wird. (b) $t < \tau$: Die Spannungsstufe läuft im Kabel mit der Geschwindigkeit v_{ph} nach rechts (nur *einfallendes* Signal). (c) $\tau < t < 2\tau$: Die Spannungsstufe wird am offenen Ende reflektiert und läuft wieder nach links (nur *reflektiertes* Signal). (d) $\tau < t < 2\tau$: Überlagerung des links- und rechtslaufenden Signals.

Im Folgenden wird angenommen, dass die am Kabeleingang angeschlossene Signalquelle an die Kabelimpedanz angepasst ist und somit keine Reflexionen am Kabeleingang auftreten.

Die Zeitabhängigkeit der Spannungen U_1 (am Eingang) und U_2 (am Ende) ergibt sich aus der Überlagerung der links- und rechtslaufenden Spannungsstufe (Abbildung 2). Zum Zeitpunkt $t=0$ wird von der Signalquelle die Spannung am Eingang stufenförmig von 0 auf den Wert U_0 erhöht. Diese Spannungsstufe erreicht nach der Zeit $t=\tau$ das offene Ende, wo sie vollständig reflektiert wird (reflexionskoeffizient 1). Durch die Überlagerung von einfallender und reflektierter Spannungsstufe ($\rho=1$) steigt das Signal U_2 dort zu diesem Zeitpunkt auf $2U_0$ an (vgl. Abbildung 1d)). Zum Zeitpunkt $t=2\tau$ erreicht die reflektierte Spannungsstufe den Kabeleingang, wo dann ebenfalls die Spannung wegen der Überlagerung des reflektierten Signales mit der Quellspannung auf $2U_0$ ansteigt. Da die Impedanz der Spannungsquelle an jene des Kabels angepasst ist, erfolgt hier keine weitere Reflexion und U_1 und U_2 bleiben für $t>2\tau$ konstant.

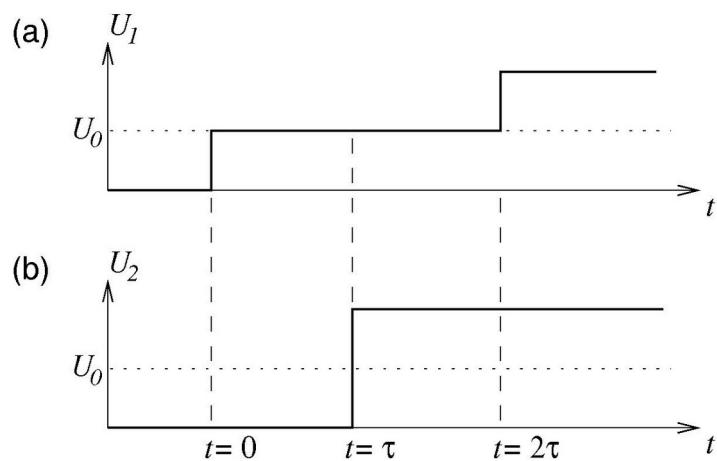


Abbildung 2: Zeitabhängigkeit der Spannungen am Kabelein- und -ausgang.

Fällt nun die Spannung am Eingang wieder abrupt auf Null, wiederholt sich der Vorgang mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Reflexion bei beliebigem Abschlusswiderstand und Impedanz der Spannungsquelle lässt sich analog abhandeln, wobei die Reflexionskoeffizienten von 1 abweichen und Reflexionen an beiden Kabelenden auftreten können

Kontrollfragen

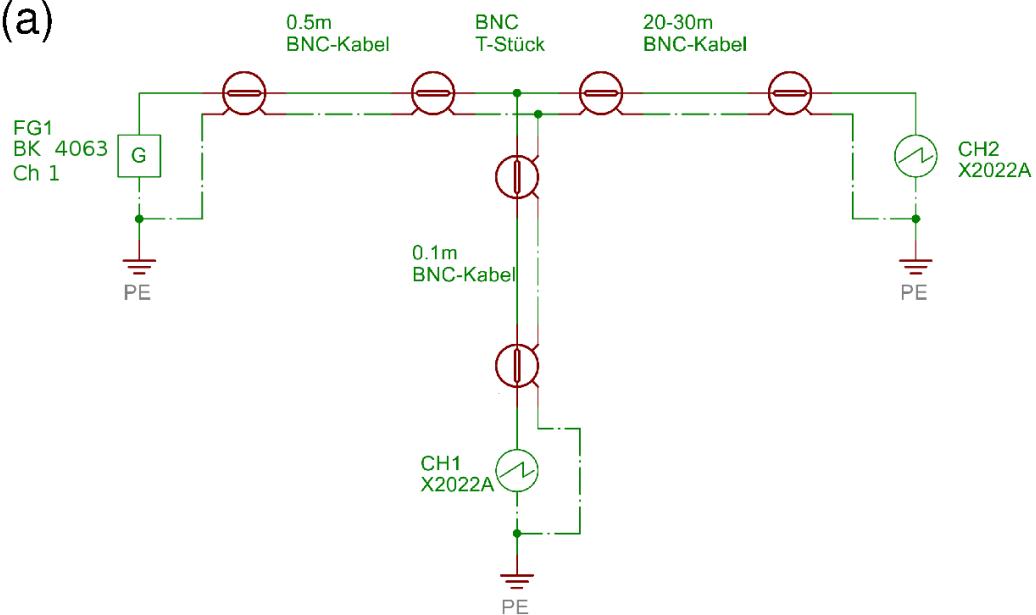
- Was versteht man unter Kapazitätsbelag und Induktivitätsbelag eines Kabels?
- Was versteht man unter Abschluss-Impedanz?
- Wie kann man den Reflexionskoeffizienten eines Kabel-Abschlusses experimentell bestimmen?
- Wie lässt sich experimentell die Kabel-Impedanz bestimmen?
- Erklärung der Reflexion einer Spannungsstufe am offenen Kabelende.
- Erklärung der Reflexion einer Spannungsstufe am kurzgeschlossenen Kabelende.
- Von welcher Größe hängt die Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Koaxialkabel ab?
- Berechnen Sie den Reflexionskoeffizienten eines Koaxialkabels mit 50 Ohm Impedanz, wenn es mit einem 10 Ohm Widerstand abgeschlossen ist.

Versuchsanleitung

Zu 1. Messung und Erklärung des zeitlichen Spannungsverlaufes am Anfang und Ende eines 20 m langen Koaxialkabels für eine Rechteckspannung und Spannungspulse

- a) Aufbau gemäß Abb.3a). Als Signalquelle dient ein *BK-Precision 4063* Frequenzgenerator. Der Innenwiderstand des Frequenzgenerators ist an die Impedanz der verwendeten Koaxial-Kabels (BNC-Kabel; BNC [*Bayonet Neill Concelman*] bezeichnet die Art der Steckverbinder) angepasst. Wählen Sie „Pulse“ mit 300 kHz als Signal. Beginnen Sie mit einer Pulsdauer von 100ns („Duty“ 3%). Messen und Dokumentieren Sie den zeitlichen Spannungsverlauf am Kabelein- und -ausgang mit den beiden Kanälen eines *Agilent DSO-X 2022A* Oszilloskops. Verändern Sie die Pulsdauer zu kleineren und größeren Werten (bis mindestens 1 μ s bzw. „Duty“ 30%), dokumentieren und erklären Sie die aufgezeichneten Spannungsverläufe und die beobachteten Veränderungen.
- b) Erhöhung des „Innenwiderstandes“ der Signalquelle durch einen in Serie geschalteten Widerstand (Abb. 3 b): Verwenden Sie wieder 1 μ s Pulse als Signal. Messen, Dokumentieren und erklären Sie den zeitlichen Spannungsverlauf am Kabelein- und -ausgang mit den beiden Kanälen des Oszilloskops.
- c) Verringerung des „Innenwiderstandes“ der Signalquelle durch einen parallel geschalteten Widerstand (Abb. 4 a). Verwenden Sie 1 μ s Pulse als Signal. Messen, Dokumentieren und erklären Sie den zeitlichen Spannungsverlauf am Kabelein- und -ausgang mit den beiden Kanälen des Oszilloskops.

(a)



(b)

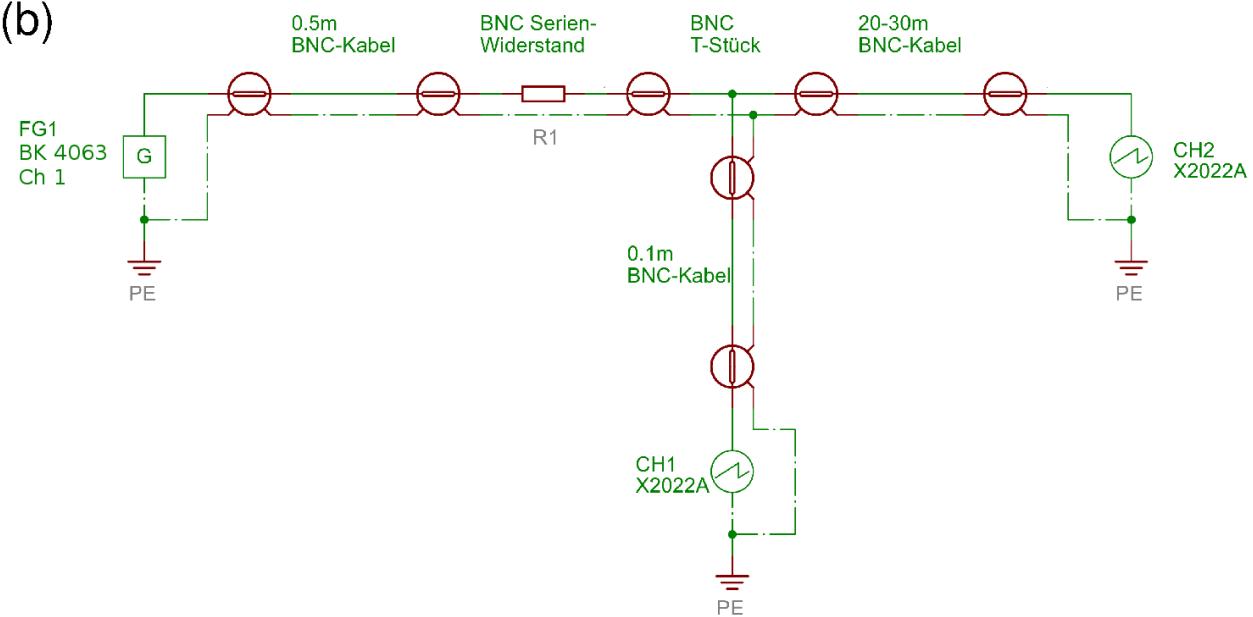
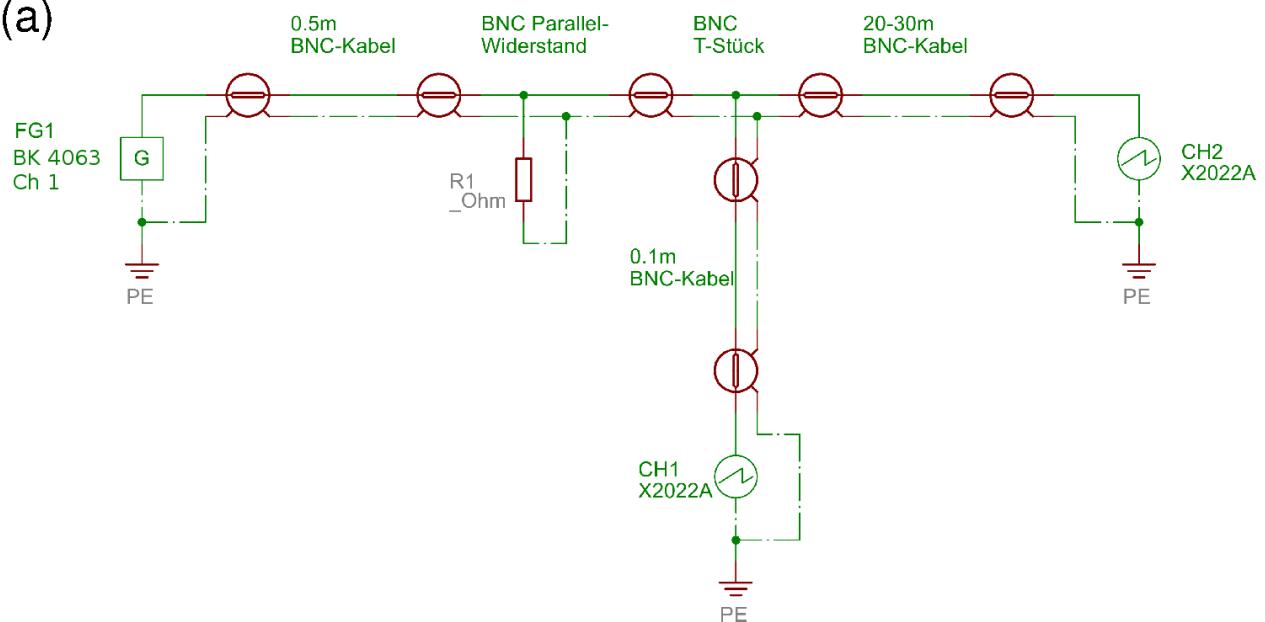


Abbildung 3: Schaltpläne zu den Aufgaben 1 a (a) und 1 b (b).

(a)



(b)

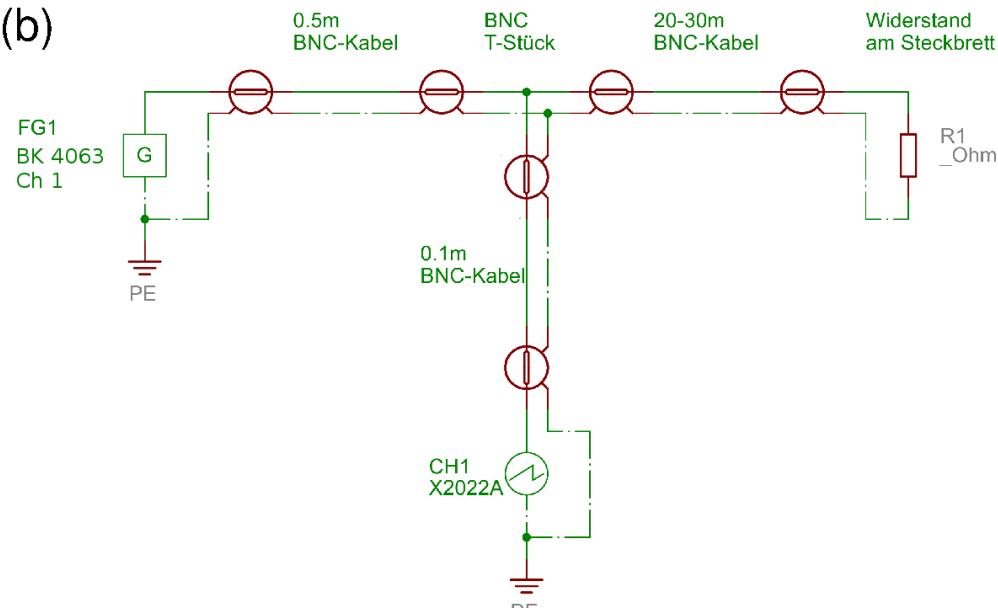


Abbildung 4: Schaltpläne zu den Aufgaben 1 c (a) und 2 (b).

Zu 2. Bestimmung des Reflexionskoeffizienten des Kabelendes als Funktion des Abschlusswiderstandes und Bestimmung der Kabelimpedanz.

- Aufbau gemäß Abb.4 b). Verwenden Sie jeden am Steckbrett vorhandenen Widerstand als Abschlusswiderstand. Erstellen Sie ein Diagramm, in dem der Reflexionskoeffizient ρ über dem Abschlusswiderstand aufgetragen ist (Vorzeichen beachten!). Bestimmen Sie die Kabelimpedanz aus dem Widerstandswert für $\rho=0$ (keine Reflexion) durch lineare Interpolation der Messpunkte.

- b) Verwenden Sie die ermittelte Kabelimpedanz, um den theoretischen Verlauf des Reflexionskoeffizienten als Funktion des Abschlusswiderstandes zu berechnen (Distanz zwischen den berechneten Werten max. 10Ω). Zeichnen Sie diesen in das Diagramm mit den Messwerten ein.
- c) Messen Sie den Reflexionskoeffizienten bei Verwendung des BNC-Abschlusswiderstandes. Vergleichen Sie das Ergebnis mit jenem aus 2 b).

Zu 3. Bestimmung der Signalgeschwindigkeit im Koaxialkabel

Bestimmen Sie die Signalgeschwindigkeit aus der Länge des Koaxialkabels und der beobachteten Signallaufzeit. Berechnen Sie die relative Permittivität des Isolatormaterials.

Zu 4. Dimensionierung der Widerstände für einen symmetrischen Verzweiger. Experimentelle Demonstration der Funktion der Schaltung.

Aufbau gemäß Abb. 5. An ein Koaxialkabel ist die Signalquelle (Funktionsgenerator) anzuschließen, die beiden anderen Kabel müssen mit Abschlusswiderständen versehen werden, um Reflexionen an den Kabelenden zu vermeiden.

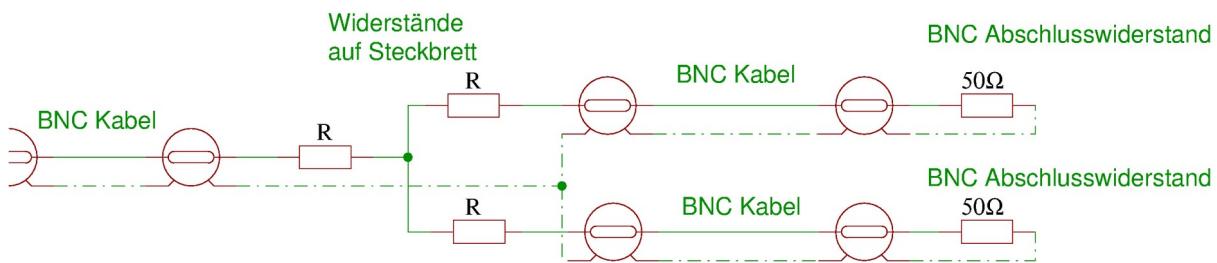


Abbildung 5: Skizze eines symmetrischen Verzweigers. Bei geeigneter Wahl des Widerstandswertes R treten keine Reflexionen an dem Verzweiger auf.

Zu 5. (Option) Wiederholung von Punkt 1 a), allerdings für eine Dreiecksspannung (Frequenzbereich 100 kHz) und/oder eine Sinusspannung (Frequenzbereich 0.5 bis 6 MHz).

Aufbau gemäß Abb.3a). *Dreiecksspannung*: Wählen Sie eine Frequenz im Bereich 100 kHz. Erklären Sie die Beobachtungen. *Sinusspannung*: Beobachten Sie die zeitlichen Spannungsverläufe am Kabelein- und -ausgang sowie deren Phasenverschiebung bei mehreren Frequenzen im angegebenen Frequenzbereich. Erklären Sie die Beobachtungen.

Hinweise zur Erstellung des Laborberichtes

- Aufgabenstellung
- Voraussetzungen und Grundlagen: *Kurze Beschreibung der Signalausbreitung auf Kabeln. Erklären Sie Kapazität, Induktivitäts und Widerstandsbelag, Kabel- und Abschlussimpedanz. Fassen Sie sich kurz (insgesamt maximal 2 Seiten) und zitieren Sie (Bücher aber keine Skripten)!*
- Geräteliste
- Für jedes der durchgeführten Experimente:
 - Beschreibung der Versuchsanordnung: *Skizze der Schaltpläne (die Schaltpläne aus diesem Skriptum können verwendet werden) und Beschreibung der Funktion: Was wollen Sie herausfinden, was messen Sie und wie kann man die Messungen auswerten.*
 - Versuchsdurchführung/Messergebnisse
 - Auswertung: zu 1.: *Erstellen Sie ein Diagramm der gemessenen Spannung am Kabeleingang und -ausgang als Funktion der Zeit für jeden der unterschiedlichen Fälle. Erklären Sie die Diagramme.*
 - Auswertung zu 2.: *Tragen Sie in einem Diagramm den Reflexionskoeffizienten als Funktion des Abschlusswiderstandes auf (Fehlerbalken!). Berechnen Sie durch lineare Interpolation die Kabelimpedanz. Berechnen Sie mit der so bestimmten Kabelimpedanz den theoretischen Verlauf des Reflexionskoeffizienten (z.B. von 0 bis $2k\Omega$ in Schritten von 10Ω) und tragen Sie ihn in das gleiche Diagramm ein.*
 - Auswertung zu 3.: *Erklären Sie, wo in den Diagrammen zu 1. die Signallaufzeit erkennbar ist. Bestimmen Sie diese und aus ihr die Signalgeschwindigkeit und die Permittivität des Isolatormaterials.*
- Diskussion: *Geben Sie für jede Messgröße deren Unsicherheit quantitativ mit einer kurzen Begründung an. Bei abgeleiteten Größen (hier z.B. Reflexionskoeffizienten, Kabelimpedanz, Permittivität) berechnen Sie die Beiträge der einzelnen Messunsicherheiten zur Gesamtunsicherheit getrennt quantitativ und summieren sie diese erst dann zur Berechnung der Gesamtsicherheit. Diskutieren Sie eventuelle, signifikante Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Reflexionskoeffizienten.*
- Zusammenfassung: *Angabe aller wesentlichen Messergebnisse mit Unsicherheiten; Verweise auf wesentliche Diagramme (Abbildung Nr, Seite); Stimmen die Messergebnisse innerhalb der Unsicherheiten mit den Rechnungen / Literaturwerten überein oder nicht?*
- Literatur

Literatur

- *Demtröder, Experimentalphysik 2, 4. oder 5. Auflage, Kap. 7.9.3. (b): Koaxialkabel (4. Auflage S. 212, 5 Auflage S. 216)*

Versionen

Skriptum

29.09.2025: Umstellung der Abschnitte, kleine Korrekturen.

25.08.2016: Umstellung auf neu angeschaffte BK-Precision 4063 80MHz Funktionsgeneratoren und Pulse als Signal, unter Einbezug von Vorschlägen von K. Rumpf und F. Hanauer

13.10.2014: Korrektur einiger Fehler nach dankenswerten Kommentaren von F. Hanauer

28.08.2014: Ersatz der (nicht normgerechten) Schaltpläne durch F. Hanauer. Danke!

07.08.2014: Verbesserungen nach Vorschlägen von Robert Seebacher. Danke!

26.05.2014: Fokussierung der Kontrollfragen auf das Experiment.

12.12.2013: Erster Entwurf, basierend auf einer Übung des ehemaligen „F-Labors“ mit Rechteckspannung als Signal.

Aufbau

12.12.2013: Neues Oszilloskop / Funktionsgenerator; Testboard mit BNC-Anschlüssen von F. Hanauer, K. Ansperger, Institut für Physik, Karl-Franzens Universität Graz