

Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik

Versuch GET 12: Leitungen

Standort: Labore im Helmholtzbau H2546, H2548 und H2549

1. Ziel und Inhalt

Messung von primären und sekundären Leitungsparametern. Berechnung der Signalausbreitung bei An- und Abschalten realer Spannungsquellen an verlustlose Leitungen bei Variation der Reflexionsfaktoren am Leitungsanfang und Leitungsende. Verifikation der Ergebnisse durch Experimente mit verlustarmen Leitungen. Die Messungen werden an handelsüblichen Koaxialkabeln durchgeführt.

2. Vorausgesetztes Wissen

- Aufbau und Bedienung eines Oszilloskops,
d.h. Durchführung des Versuches GET2 „Digitalspeicheroszilloskop“.
- Berechnung von einfachen Ausgleichsvorgängen,
d.h. Durchführung des Versuches GET3 „Schaltverhalten an C und L“.
- Berechnung der sekundären Leitungsparameter verlustbehafteter und verlustloser Leitungen.
- Berechnung des Signalverlaufs auf verlustlosen Leitungen beim Anschalten an eine reale Spannungsquelle.
- Die Entstehung stehender Wellen auf Leitungen bei harmonischer Erregung.

3. Literatur und Material zur Vorbereitung

- Vorlesungs-und Übungsunterlagen der Elektrotechnik 2
- Lehrbuch Seidel/Wagner: Allgemeine Elektrotechnik Band 2, Unicopy Campus Edition, Ilmenau 2011
- Lernprogramm “Leitungen” im “LearnWeb” von “GETsoft”

4. Vorbereitung

4.1 Verlustbehaftete Leitung

Skizzieren Sie das Ersatzschaltbild eines Leitungselementes einer verlustbehafteten Leitung bei harmonischer Erregung.

Geben Sie die Formeln für die Berechnung der sekundären Leitungsparameter $\underline{Z}_w$ und $\underline{\gamma}$ aus den primären Leitungsparametern R' , L' , G' und C' an.

Ermitteln Sie die Dämpfungskonstante α und die Phasenkonstante β aus $\underline{\gamma}$ sowie die Phasengeschwindigkeit v aus β .

4.2 Bestimmung von $\underline{Z}_w$ aus den Leitungsgleichungen in Vierpolform

Leiten Sie die Formel zur Bestimmung des Wellenwiderstandes $\underline{Z}_w$ über Kurzschluss- und Leerlaufversuch aus den beiden Leitungsgleichungen in Vierpolform her (Koordinatenursprung am Anfang der Leitung):

$$\begin{aligned}\underline{U}(x) &= +\underline{U}_0 \cosh(\underline{\gamma}x) - \underline{I}_0 \underline{Z}_w \sinh(\underline{\gamma}x) \\ \underline{I}(x) &= -\frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_w} \sinh(\underline{\gamma}x) + \underline{I}_0 \cosh(\underline{\gamma}x)\end{aligned}$$

4.3 Verlustlose Leitung

Geben Sie die Bedingungen für Verlustfreiheit einer Leitung an und skizzieren Sie das Ersatzschaltbild eines Leitungselementes.

Leiten Sie die sekundären Leitungsparameter Wellenwiderstand Z_w und Phasengeschwindigkeit v der verlustlosen Leitung aus den Formeln der sekundären Leitungsparametern $\underline{Z}_w$ und $\underline{\gamma}$ der verlustbehafteten Leitung her.

Was folgt aus der Reellwertigkeit des Wellenwiderstandes und der Frequenzunabhängigkeit der Phasengeschwindigkeit?

4.4 Anschalten einer realen Spannungsquelle an eine verlustlose Leitung

An eine verlustlose Leitung der Länge $l = 50\text{m}$ und $Z_w = 50\Omega$ wird eine reale Spannungsquelle mit $U_q = 3\text{V}$ und $R_i = 50\Omega$ angeschaltet. Wir untersuchen folgende Lastfälle am Leitungsende: Leerlauf, Lastfall 100Ω , Anpassung 50Ω und Kurzschluss.

Zeichnen Sie für jeden der vier Lastfälle jeweils zusammen in einem Bild die Oszillogramme von Spannungsverläufen am Leitungsanfang $u(0, t)$ und in der Mitte der Leitung $u(l/2, t)$, d.h. 4 Bilder mit je 2 Verläufen. Die Zeitachse ist auf die Signallaufzeit t_l zu normieren.

Wählen Sie den Maßstab und die Größe der Bilder so, dass Sie ihre Messdaten aus 6.5 in die hier vorgefertigten Diagramme eintragen können.

4.5 Bestimmung der Zeitkonstante τ

Leiten Sie die Formel zur Bestimmung von τ aus der Halbwertszeit t_H entsprechend der Versuchsanleitung GET3 „Schaltverhalten an C und L“ her.

4.6 Stehende Wellen bei harmonischer Erregung

In eine am Ende offene (leerlaufende) Leitung wird bei Anpassung am Leitungsanfang eine sinusförmige Spannung eingespeist. Die hinlaufende und die rücklaufende Welle überlagern sich zu einer stehenden Welle, deren Schwingungsknoten bzw. Schwingungsbäuche jeweils $\lambda/2$ auseinanderliegen. Die Leitungslänge l ist unbekannt und wird gesucht.

Wir stellen eine Frequenz der Erregung f_1 ein, bei der sich am Leitungsanfang ein Spannungsminimum (Schwingungsknoten) befindet. In diesem Fall bilden sich zwischen Leitungsanfang und Leitungsende n Knoten. Jetzt verringern wir die Frequenz solange, bis sich bei der Frequenz f_2 am Leitungsanfang wieder ein Spannungsminimum (Schwingungsknoten) befindet. Zwischen Leitungsanfang und Leitungsende haben wir jetzt einen Knoten weniger, also $n - 1$ Knoten.

Skizzieren Sie die Spannungsverteilung für $n = 4$. Beachten Sie, dass sich am Leitungsende wegen der offenen Leitung (Leerlauf) ein Schwingungsbauch befindet!

Stellen Sie für die beiden Frequenzen die Gleichungen für die Leitungslänge in Abhängigkeit von n und $\lambda/2$ auf und eliminieren Sie n , sodass wir die Leitungslänge l aus den beiden zu f_1 und f_2 gehörenden Wellenlängen auf der Leitung, λ_1 und λ_2 , berechnen können.

4.7 Bereiten Sie das Messprotokoll vor.

5. Geräte und Baugruppen am Versuchsplatz

- 1 Digitalspeicheroszilloskop TBS1102B
- 1 Funktionsgenerator HMF2525
- 1 LCR-Messgerät HM8018
- 1 Impedanzmessgerät AA-600
- BNC Abschlusswiderstände 0Ω und 50Ω
- Diverse BNC Verbinder und T-Stücke
- 1 Potentiometer 250Ω
- 1 Widerstand $24k\Omega$
- 1 Relais
- 1 Bleiakku
- 1 Rolle 50m Koaxialkabel **RG-58**:

$$Z_w = 50\Omega; \text{ Verkürzungsfaktor } v/c = 0,66; C' = 100 \text{ pF/m}$$

- 1 Rolle 50m Koaxialkabel **Aircell-7** mit Mittenanzapfung:

$$Z_w = 50\Omega; \text{ Verkürzungsfaktor } v/c = 0,85; C' = 78 \text{ pF/m}$$

6. Messung und Auswertung

Da uns kein Einzelimpulsgenerator zur Verfügung steht, benutzen wir periodische Rechtecksignale, deren Frequenz so gering ist, dass die Reflexionen innerhalb der Periodendauer abgeklungen sind.

Bei harmonischer Erregung wird die Frequenz der angelegten Spannung so eingestellt, dass die Leitungslänge viel kleiner als die Wellenlänge auf der Leitung ist, anders in der Messaufgabe mit stehenden Wellen.

Der Innenwiderstand R_i des Generators beträgt 50Ω .

6.1 Messung von Wellenwiderstand und Kabelkapazität mit dem Impedanzmessgerät

Messobjekte sind die Koaxialkabel **RG-58** und **Aircell-7**.

Die Messungen werden bei einer Frequenz von $f = 300\text{kHz}$ durchgeführt.

Leerlauf am Kabelende: Messen Sie die Kabelkapazität C und die Eingangsimpedanz Z_{0L} .

Kurzschluss am Kabelende: Messen Sie die Eingangsimpedanz Z_{0K} .

Berechnen Sie die Wellenwiderstände Z_w aus Z_{0K} und Z_{0L} .

Vergleichen Sie die ermittelten Parameter mit den Angaben des Datenblatts (s. Punkt 5)

6.2 Signallaufzeiten auf den Verbindungskabeln zum Oszilloskop

Um die Anschlussbuchsen am Oszilloskop und am Generator mechanisch zu entlasten, werden die Signale über Verbindungskabel eingespeist bzw. abgenommen. Diese sind farblich markiert: Generator - rot, Oszilloskop Kanal 1 - gelb und Oszilloskop Kanal 2 - blau.

Durchführung der Messung:

Stellen Sie am Generator im Leerlauf, d.h. ohne Kabel, eine **positive Rechteckspannung** von $U_{\max} = 3\text{V}$ bei $f = 1\text{kHz}$ mit dem Tastverhältnis 1:1 ein.

Schließen Sie das blaue Verbindungskabel direkt an den Kanal 2 des Oszilloskops an.

Schließen Sie einen T-Verteiler direkt an den Kanal 1 des Oszilloskops an. Einen Abzweig des T-Verteilers verbinden Sie mit dem Generator (rotes Verbindungskabel). An den anderen Abzweig schließen Sie das gelbe Verbindungskabel an.

Schalten Sie das gelbe und das blaue Verbindungskabel mit einem Verbindungsstück zusammen.

Messen Sie die Laufzeit der positiven Signalflanke über die Zusammenschaltung zweier Verbindungskabel (gelb und blau).

6.3 Laufzeit, Wellenwiderstand und Verkürzungsfaktor der Koaxialkabel

Messobjekte sind die Koaxialkabel **RG-58** und **Aircell-7**.

Stellen Sie am Generator im Leerlauf, d.h. ohne Kabel, eine **positive Rechteckspannung** von $U_{\max} = 3\text{V}$ bei $f = 1\text{kHz}$ mit dem Tastverhältnis 1:1 ein.

Oszilloskop Kanal 1: Schließen Sie das gelbe Verbindungskabel direkt an den Kanal. Schließen Sie an das Verbindungskabel einen T-Verteiler an: ein Abzweig am Generator und der andere Abzweig an Kabelanfang (Messobjekt).

Oszilloskop Kanal 2: Schließen Sie das blaue Verbindungskabel direkt an den Kanal. Schließen Sie an das Verbindungskabel einen T-Verteiler an: ein Abzweig am Potentiometer und der andere Abzweig an Kabelende (Messobjekt).

Messen Sie die Laufzeit der positiven Signalflanke.

Überlegen Sie, ob die Signallaufzeiten der Verbindungskabel die gemessene Laufzeit über das 50m-Kabel verfälschen und deshalb herausgerechnet werden müssen oder nicht.

Stellen Sie mit dem 250Ω -Potentiometer Reflexionsfreiheit ein. Bestimmen Sie den Widerstandswert des Potentiometers mit dem LCR-Messgerät.

Berechnen Sie aus der Signallaufzeit und der Leitungslänge die Phasengeschwindigkeit v auf der Leitung und daraus den Verkürzungsfaktor v/c . Bestimmen Sie aus dem Widerstandswert des Potentiometers den Wellenwiderstand der Leitung.

6.4 Bestimmung der Leitungslänge über stehende Wellen bei harmonischer Erregung

Messobjekt ist das Koaxialkabel **RG-58**.

Stellen Sie zuerst am Generator im Leerlauf, d.h. ohne Kabel, eine **sinusförmige** Spannung von $U_{\max} = 3V$ bei $f = 7\text{MHz}$ ein.

Oszilloskop Kanal 1: T-Verteiler wird direkt angeschlossen. Ein Abzweig am Generator und der andere Abzweig am Kabelanfang (Messobjekt).

Oszilloskop Kanal 2: Das Kabelende (Messobjekt) wird direkt angeschlossen.

Verringern Sie die Frequenz so lange, bis sich am Leitungsanfang ein Spannungsknoten, d.h. ein Spannungsminimum, einstellt: Wellenlänge λ_1 bei Frequenz f_1 , n Knoten auf der Leitung.

Verringern Sie die Frequenz so lange weiter, bis sich am Leitungsanfang wieder ein Spannungsknoten einstellt: Wellenlänge λ_2 bei Frequenz f_2 , $n - 1$ Knoten auf der Leitung.

Kontrollieren Sie, dass die Spannungsamplitude am Leitungsende während der Frequenzänderung etwa konstant bleibt, da sich dort, unabhängig von der Frequenz, immer ein Spannungsbauch (Spannungsmaximum) befindet.

Berechnen Sie mit der in der Vorbereitung hergeleiteten Formel die Kabellänge l .

6.5 Anschalten einer realen Spannungsquelle an eine verlustarme Leitung: Spannung am Leitungsanfang und in der Leitungsmitte bei verschiedenen Lastfällen am Leitungsende

Messobjekt ist das Koaxialkabel **Aircell-7**.

Stellen Sie am Generator im Leerlauf, d.h. ohne Kabel, eine **positive Rechteckspannung** von $U_{\max} = 3V$ bei $f = 1\text{kHz}$ mit dem Tastverhältnis 1:1 ein.

Oszilloskop Kanal 1: Schließen Sie das gelbe Verbindungskabel direkt an den Kanal. Schließen Sie an das Verbindungskabel einen T-Verteiler an: ein Abzweig am Generator und der andere Abzweig am Kabelanfang (Messobjekt).

Oszilloskop Kanal 2: Schließen Sie das blaue Verbindungskabel direkt an den Kanal. Verbinden Sie das freie Ende mit dem Anschluss in der Kabelmitte (Messobjekt).

Führen Sie je eine Messung

- im Leerlauf (Anschluss offen),
- beim Lastfall 100Ω (am Potentiometer 100Ω einstellen),
- bei Anpassung (Abschlusswiderstand 50Ω) und
- bei Kurzschluss (Abschlusswiderstand 0Ω)

am Kabelende durch.

Zeichnen Sie die Oszillogramme in die vorbereiteten Diagramme aus 4.4.

6.6 An- und Abschalten einer hochohmigen, realen Spannungsquelle am Kabelanfang bei Leerlauf am Kabelende

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 1 mit dem Widerstand $R = 24\text{k}\Omega$ und der Spannungsquelle U_q (Bleiakku) auf. Beschalten Sie den Eingang des Kabels mit dem Relais derart, dass der Kabelanfang zyklisch kurzgeschlossen wird. Das Relais wird mit einer sinusförmigen Generatorspannung bei $f = 10\text{Hz}$ und $U_{\text{max}} = 5\text{V}$ angesteuert.

Bestimmen Sie den Wert des $24\text{k}\Omega$ -Widerstandes R mit dem LCR-Messgerät.

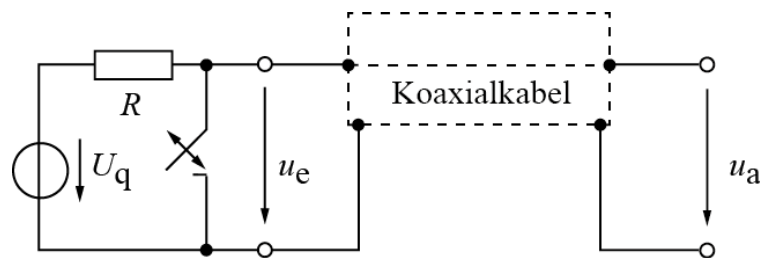


Bild 1. An- und Abschalten einer realen Spannungsquelle am Kabelanfang

Für **6.6.1** und **6.6.2** gilt für Oszilloskop Kanal 1:

Das Verbindungskabel direkt an Kanal anschließen, an das freie Ende ein Spezialverteiler: ein Abzweig an der realen Spannungsquelle und Schalter, der andere Abzweig am Kabelanfang.

6.6.1 Spannung am Leitungsanfang bei sich öffnenden Schalter und Messung der Kabelkapazität

Messobjekte sind die Koaxialkabel **Aircell-7** und **RG-58** mit Leerlauf am Kabelende.

Oszilloskop Kanal 2: nicht beschaltet. **Das Kabelende bleibt offen.**

Bestimmen Sie die Spannung U_q des Bleiakkus, welche der Endwert U_∞ der Spannung des Aufladevorgangs ist.

Oszillografieren Sie die ansteigende Flanke der Eingangsspannung, d.h. wenn der Schalter öffnet. Bestimmen Sie die Zeitkonstante τ entsprechend der Vorbereitung. Bestimmen Sie aus der Zeitkonstante τ und dem bekannten Widerstand R den Kapazitätsbelag C' der beiden Koaxialkabel. Vergleichen Sie den Wert mit dem Datenblatt und dem Ergebnis aus 6.1.

6.6.2 Spannung am Leitungsanfang bei sich schließenden Schalter

Messobjekt ist das Koaxialkabel **RG-58**.

Oszilloskop Kanal 2: Kabelende wird direkt angeschlossen.

Zeichnen Sie die Spannungen am Kabelanfang und Kabelende, wenn der Schalter schließt.

Erarbeiten Sie eine Begründung des Verlaufes der Spannung am kurzgeschlossenen Kabelanfang und leerlaufenden Kabelende über die Betrachtung der Werte von r_0 und r_l .