

**PROTOKOLL ZUM ANFÄNGERPRAKTIKUM
PHYSIK**

**Signalübertragung auf LC-Ketten
und Koaxialkabeln**

-Teil 2-

Sebastian Finkel
Sebastian Wilken

**Versuchsdurchführung:
21. Juni 2006**

0. Inhalt

1. Einleitung

2. Theoretischer Teil

- 2.1. Differentialgleichung einer homogenen Leitung
- 2.2. Lösung der Differentialgleichung für die homogene Leitung
- 2.3. Wellenwiderstand der homogenen Leitung
- 2.4. Signalreflexion an einer homogenen Leitung
- 2.5. Koaxialkabel

3. Praktischer Teil

- 3.1. Abschlusswiderstand
- 3.2. Signallaufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit
- 3.3. Mehrfachreflexionen
- 3.4. Reflexionskoeffizient

4. Anhang

- 4.1. Literatur
- 4.2. Abbildungsnachweis

5. Anlage (Messwertabellen)

1. Einleitung

Im zweiten Teil des Doppelversuchs „Signalübertragung auf LC-Ketten und Koaxialkabeln“ werden wir uns mit den Übertragungseigenschaften von Koaxialkabeln beschäftigen. Wir werden zunächst die homogene Leitung als Modell betrachten, um die wichtigen Gleichungen im Zusammenhang mit Koaxialkabeln herzuleiten. Im praktischen Teil untersuchen wir dann verschiedene Kabel in Bezug auf ideale Abschlusswiderstände, die Signal-Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie Reflexionen bei der Signalübertragung.

2. Theoretischer Teil

2.1. Differentialgleichung einer homogenen Leitung

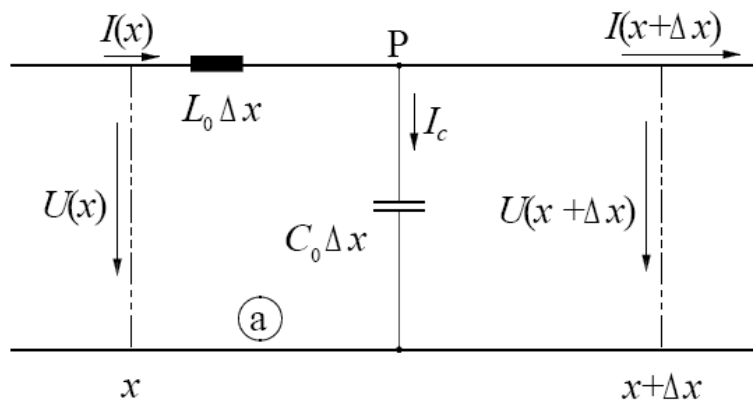


Abb. 1: Ausschnitt aus einem Koaxialkabel.

Wir betrachten eine Leitung, bei der die Kapazität C_0 und die Induktivität L_0 homogen über die gesamte Verbindungsstrecke verteilt sind. Wir können somit also nur Aussagen über einen bestimmten Ort x der Leitung im Verhältnis zu einem Nachbarort $x + \Delta x$ machen. Zwischen diesen beiden Orten liegt die Induktivität $L_0 \Delta x$ und die Kapazität $C_0 \Delta x$. Wir können nun die Maschenregel auf die Masche a in Abbildung 1 anwenden und erhalten dann nach einigen Umformungen:

$$(1) \quad \frac{\partial U}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial I}{\partial t}$$

Bei einer räumlichen Änderung der Spannung können wir also eine zeitliche Änderung des Stroms beobachten. In analoger Betrachtung des Knotens P erhalten wir gemäß der Knotenregel und einigen Umformungen:

$$(2) \quad \frac{\partial I}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U}{\partial t}$$

Wir erhalten hier also bei einer räumlichen Änderung des Stroms eine zeitliche Änderung der Spannung.

Wir können nun jeweils für Spannung und Strom eine eigene Differentialgleichung herleiten, indem wir die Gleichungen (1) und (2) ableiten, beide kombinieren und entweder I oder U eliminieren. Damit ergibt sich dann:

$$(3) \quad \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{1}{L_0 C_0} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad \text{DGL für Spannungsverlauf}$$

$$(4) \quad \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = \frac{1}{L_0 C_0} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \quad \text{DGL für den Stromverlauf}$$

Beide Gleichungen stellen jeweils eindimensionale Wellengleichungen dar.

2.2. Lösung der Differentialgleichung für die homogene Leitung

Als allgemeine Lösung der Wellengleichung (3) ergibt sich:

$$(5) \quad U(x, t) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad \text{mit } f_1, f_2 \text{ als beliebige Funktionen}$$

Als Lösung für die Wellengleichung (4) ergibt sich dann analog:

$$(6) \quad I(x, t) = g_1(x - ct) + g_2(x + ct) \quad \text{mit } g_1, g_2 \text{ als beliebige Funktionen}$$

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Wellen gilt:

$$(7) \quad c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

Eine homogene Leitung ist also scheinbar dispersionsfrei, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzunabhängig ist.

2.3. Wellenwiderstand der homogenen Leitung

Wir wollen nun den Zusammenhang zwischen Strom und Spannungsverlauf in einer homogenen Leitung näher untersuchen. Wir wissen, dass Strom- und Spannungswellen jeweils in positive wie in negative x -Richtung laufen. Es gilt dann:

$$(8) \quad \frac{\partial U_+}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial I_+}{\partial t} \quad (\text{nach rechts laufende Welle})$$

$$(9) \quad \frac{\partial U_-}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial I_-}{\partial t} \quad (\text{nach links laufende Welle})$$

Wir können nun jeweils nach U_+ , U_- und nach I_+ , I_- partiell ableiten und die Ausdrücke wieder in unsere Gleichungen einsetzen. Wenn wir diese dann integrieren, erhalten wir:

$$(10) \quad \frac{U_+}{I_+} = L_0 c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$(11) \quad \frac{U_-}{I_-} = -L_0 c = -\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Diese beiden Gleichungen stellen nun wie das OHMSche Gesetz den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom dar. Wir bezeichnen die Proportionalitätskonstante als Wellenwiderstand Z_0 :

$$(12) \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

2.4. Signalreflexion an einer homogenen Leitung

Wir betrachten nun wie in Abbildung 2 dargestellt eine homogene Leitung, an deren Ende ein Verbraucher mit dem Innenwiderstand R liegt. Wir untersuchen nun, wann und wie eine rechtslaufende Welle daran reflektiert wird.

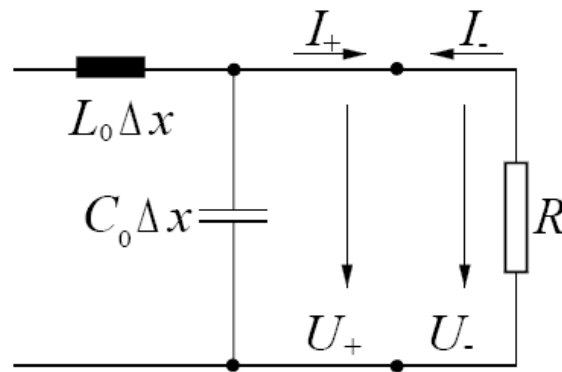


Abb. 2: Koaxialkabel mit Abschlusswiderstand.

Die nach rechts laufende Welle bezeichnen wir mit U_+ , die am Widerstand reflektierte Welle, die nach links läuft, mit U_- . Wir definieren dann den Reflexionkoeffizienten als:

$$(13) \quad \rho = \frac{U_-}{U_+}$$

Um ρ nun berechnen zu können, überlegen wir uns zunächst welche Gesamtspannung U anliegt und welcher Gesamtstrom I fließt:

$$(14) \quad I = I_+ + I_-$$

$$(15) \quad U = U_+ + U_-$$

Aus Gründen der Kontinuität gelten diese Beziehungen auch am Verbraucher, so dass wir mit dem OHMSchen Gesetz dann erhalten:

$$(16) \quad U_+ + U_- = RI_+ + RI_-$$

Wir eliminieren nun den Strom aus dieser Beziehung und erhalten dann:

$$(17) \quad U_+ + U_- = \frac{R}{Z_0} U_+ + -\frac{R}{Z_0} U_-$$

So folgt dann für den Reflexionkoeffizienten:

$$(18) \quad \rho = \frac{R - Z_0}{R + Z_0}$$

Der Reflexionskoeffizient kann je nach Wahl des OHMSchen Widerstandes Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Wir interessieren uns vor allem für folgende Sonderfälle:

- $R \rightarrow 0$: $\rho \rightarrow -1$: Die Welle wird mit umgekehrten Vorzeichen vollständig reflektiert.
- $R \rightarrow \infty$: $\rho \rightarrow +1$: Die Welle wird mit gleichem Vorzeichen vollständig reflektiert.
- $R = Z_0$: $\rho = 0$: Es findet keine Reflexion statt, eine vollständige Energieübertragung auf Verbraucher.

2.5. Koaxialkabel

Ein Koaxialkabel ist eine spezielle Form einer homogenen Leitung, die man heutzutage vielfach zur Signalübertragung von HF-Signalen nutzt.

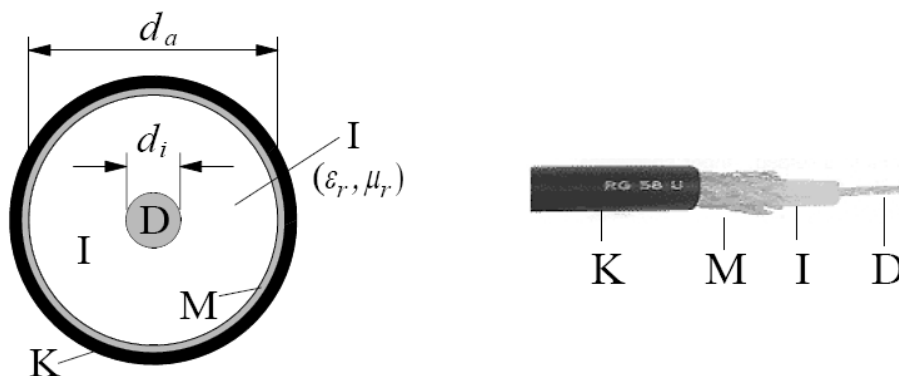


Abb. 3: Links: Querschnitt durch ein Koaxialkabel; Recht: Verschiedene Komponenten eines Koaxialkabels.

Abbildung 3 zeigt links den Querschnitt eines Koaxialkabels. Der innere Draht D hat den Durchmesser d_i und ist von einem Metallmantel M mit dem Durchmesser d_a umgeben. Zwischen Draht und Mantel befindet sich ein flexibler Isolator I mit der Dielektrizitätszahl ϵ_r und der Permeabilitätszahl μ_r . Um alles herum liegt dann noch ein äußerer Isolationsmantel. Der Vorteil eines Koaxialkabel ist neben der geforderten homogenen Verteilung der Induktivität und Kapazität, dass der Signalführer durch die äußere Litze von elektrischen Störfeldern geschützt ist. Gleichzeitig kann der Metallmantel als Signalmrückführung genutzt werden, wodurch eine Abschirmung magnetischer Störfelder gewährleistet ist.

Wir wollen uns nun anschauen, welche Ausbreitungsgeschwindigkeit ein Signal in einem Koaxialkabel hat und über welchen Wellenwiderstand ein derartiges Kabel verfügt. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich gemäß Gleichung (7):

$$(19) \quad c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r \mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

Für den Wellenwiderstand können wir nach Gleichung (12) schreiben:

$$(20) \quad Z_0 = 60 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{d_a}{d_i} \right) \Omega$$

Man erkennt, dass der Wellenwiderstand sowohl vom verwendeten Material, als auch von der Kabelgeometrie abhängt.

3. Praktischer Teil

In den folgenden Versuchsteilen verwenden wir 50- Ω -Koaxialkabel des Typs RG 58 C/U mit folgenden Eigenschaften:

- Kapazität: $C_0 = 101 \pm 2,0 \text{ pF/m}$
- Induktivität: $L_0 = 253 \pm 5,1 \text{ nH/m}$
- Wellenwiderstand: $Z_0 = 50 \pm 2 \text{ }\Omega$

Da wir nur mit vergleichsweise niedrigen Frequenzen unterhalb 1 MHz arbeiten, können wir annehmen, dass die Verluste durch Dämpfung keine Rolle spielen.

3.1. Abschlusswiderstand

Mit Hilfe einer Versuchsanordnung gemäß Abbildung 4 wollen wir diejenigen Abschlusswiderstände am Anfang und am Ende einer 10 m langen Koaxialkabelverbindung ermitteln, bei denen das vom Funktionsgenerator FG generierte Signal möglichst reflexionsfrei übertragen wird. Dazu stellen wir am FG ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 500 kHz und einer Amplitude von 4 V ein. Den Abschlusswiderstand am Ende der Leitung stellen wir nun zunächst mit einer Widerstandsdekade auf $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ein. Wir betrachten nun das Ausgangssignal des FG und suchen den Abschlusswiderstand R_1 am Anfang der Leitung, bei dem das Signal minimal verzerrt wird. Haben wir den optimalen Wert für R_1 gefunden, lassen wir diesen eingestellt und variieren nun R_2 solange, bis auch hier die Verzerrungen möglichst klein sind.

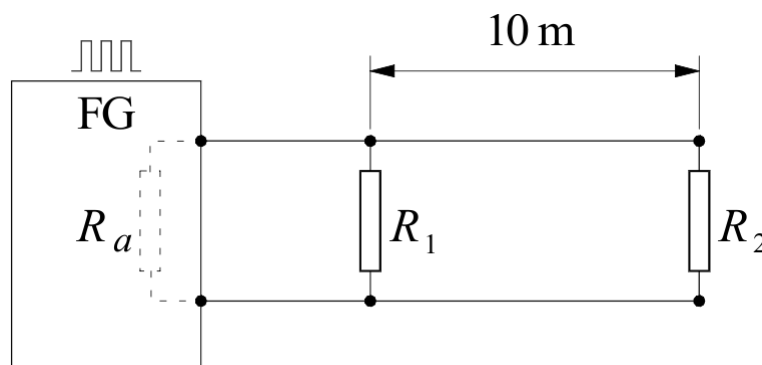


Abb. 4: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Abschlusswiderstände R_1 und R_2 .

Ein größtmöglich unverzerrtes Signal haben wir bei der Kombination aus $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 50 \text{ }\Omega$ erhalten. Es ist anzumerken, dass das „optimale“ Signal mit bloßem Auge schwer zu bestimmen ist. Daher sind die angegebenen Widerstände als Richtwerte zu verstehen, welche die Größenordnung der tatsächlichen optimalen Widerstände angeben. Vor allem bei der Bestimmung von R_1 hat sich das Signal im Bereich zwischen $1 \text{ k}\Omega$ und $3 \text{ k}\Omega$ kaum verändert, so dass wir hier den Mittelwert von $2 \text{ k}\Omega$ angeben.

Da das verwendete Koaxialkabel einen Wellenwiderstand von $50 \text{ }\Omega$ aufweist, muss gemäß unserer theoretischen Betrachtungen ein Abschlusswiderstand von $50 \text{ }\Omega$ zu den geringsten Signalverzerrungen führen. Unser Messwert für R_2 am Ende der Leitung entspricht also den Erwartungen. Für den Widerstand am Anfang der Leitung ist anzumerken, dass das Koaxialkabel hier bereits durch den Ausgangswiderstand R_a des Funktionsgenerators von etwa $50 \text{ }\Omega$ optimal abgeschlossen ist. Somit hat die Variation von R_1 keinen großen Einfluss mehr auf die Übertragung des Signals. So lässt sich auch erklären, dass wir bei der Bestimmung von R_1 in einem relativ großen Widerstands-Bereich kaum Änderungen am Signal feststellen konnten (vgl. Frage 4).

3.2. Signallaufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit

Für diesen Versuchsteil bauen wir eine Schaltung gemäß Abbildung 5 auf. Durch Hinzunahme des Kondensators mit $C = 0,1 \text{ nF}$ liegt zusammen mit dem Widerstand $R_1 = 50 \text{ }\Omega$ ein RC-Glied vor. Dieses RC-Glied stellt einen Hochpass dar und differenziert das FG-Signal (Frequenz: 500 kHz ; Amplitude: 4 V). Als Koaxialkabel wählen wir diesmal eine Leitung von $49,7 \pm 0,1 \text{ m}$ Länge. Als Abschlusswiderstand am Ende der Leitung stellen wir $R_2 = 1 \text{ }\Omega$ ein. Dadurch ist eine nahezu vollständige Reflexion des Signals mit umgekehrten Vorzeichen gewährleistet.

Wir beobachten nun den Signalverlauf am Ausgang des FG mit einem Oszilloskop und bestimmen die zeitliche Differenz zwischen dem Ausgangssignal und dem reflektierten Signal. Dabei haben wir eine Zeit von $t = 472 \pm 10 \text{ ns}$ gemessen. Der Fehler der Zeitdifferenz resultiert aus der Ables- und Einstellungs-genauigkeit am Oszilloskop. Mit Hilfe dieser Zeit können wir nun die Signallaufzeit bestimmen. Dabei ist zu Berücksichtigen, dass das Signal das Kabel zweimal durchläuft (hin und zurück), weshalb wir hier von einer Signallaufstrecke von $s = 99,4 \pm 0,2 \text{ m}$ ausgehen müssen. Damit ergibt sich für die

Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{99,4 \text{ m}}{472 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 21,05 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Für den Größtfehler ergibt sich gemäß Fehlerfortpflanzung:

$$\begin{aligned} \Delta v &= \left| \frac{\partial v}{\partial s} \right| \Delta s + \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| \Delta t = \frac{\Delta s}{t} + \frac{s \cdot \Delta t}{t^2} \\ &= \frac{0,2 \text{ m}}{472 \cdot 10^{-9} \text{ s}} + \frac{99,4 \text{ m} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ s}}{(472 \cdot 10^{-9} \text{ s})^2} = 0,49 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Wir können somit $v = (21,05 \pm 0,49) \cdot 10^7 \text{ m/s}$ als Messwert für die Ausbreitungsgeschwindigkeit festhalten. Den theoretischen Wert für die Ausbreitungsgeschwindigkeit, welcher der Lichtgeschwindigkeit c im Isolationsmaterial des Kabels entspricht, können wir wie folgt aus L_0 und C_0 bestimmen:

$$c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{253 \text{ nH} \cdot 101 \text{ pF}}} = 19,78 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Mit Hilfe von c können wir nun die erwartete Signallaufzeit bestimmen:

$$c = \frac{s}{t} \Leftrightarrow t = \frac{c}{s} = \frac{19,78 \cdot 10^7 \text{ m/s}}{99,4 \text{ m}} = 502,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

Wir erkennen somit eine Abweichung von etwa 6% zwischen der gemessenen und erwarteten Signallaufzeit sowie der gemessenen und erwarteten Ausbreitungsgeschwindigkeit. Unter Berücksichtigung der Fehlerquellen, z.B. durch zusätzliche Verbindungskabel, welche hier nicht berücksichtigt wurden, ist die Übereinstimmung zufriedenstellend (vgl. Frage 5).

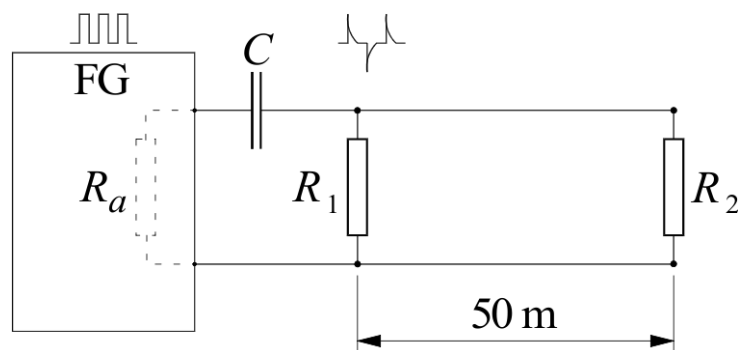


Abb. 5: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Signallaufzeit in einem Koaxialkabel.

3.3. Mehrfachreflexionen

Wir wollen nun die Mehrfachreflexionen in einem Koaxialkabel näher untersuchen. Dazu entfernen wir den Kondensator aus unserem Aufbau gemäß Abbildung 5. Am FG stellen wir eine Frequenz von 100 kHz und eine Amplitude 4 V ein. Mit Hilfe eines DC-Offsets beschränken wir uns auf ein rein positives Rechtecksignal. Wir beobachten nun mit einem Oszilloskop das Signal am Ausgang des FG für folgende Widerstandskombinationen:

- (a) $R_1 = 30 \Omega$; $R_2 = 1 \Omega$
- (b) $R_1 = 30 \Omega$; $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$

Wir erkennen einen stufenförmigen Verlauf des Spannungssignals. Für je drei Stufen vermessen wir nun deren Höhen und Längen, also die Amplituden U und die zeitlichen Längen t . Eine Skizze der Spannungssignale für die Fälle (a) und (b) zeigt Abbildung 6. Die Ergebnisse der Messung zeigt Tabelle 1. Die jeweiligen Fehler resultieren aus der Anzeigegenauigkeit am Oszilloskop.

(a) $R_1 = 30 \Omega$, $R_2 = 1 \Omega$

Stufe	U / mV	t / ns
1.	1040 ± 10	540 ± 10
2.	400 ± 10	520 ± 10
3.	180 ± 10	500 ± 10

(b) $R_1 = 30 \Omega$, $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$

Stufe	U / mV	t / ns
1.	1170 ± 10	500 ± 10
2.	440 ± 10	500 ± 10
3.	232 ± 10	500 ± 10

Tab. 1: Amplituden und zeitliche Längen der ersten drei Stufen im Signalverlauf für (a) und (b).

Wir erkennen, dass die zeitlichen Längen t der einzelnen Stufen unter Berücksichtigung der Fehlerquellen recht gut mit den unter 3.2. berechneten Signallaufzeiten übereinstimmen. Für den Fall (a) können wir aus dem beobachteten Signalverlauf folgende Schlüsse ziehen: Das Ausgangssignal des FG wird wir am Abschlusswiderstand R_2 nahezu vollständig reflektiert und kommt nach der bereits bekannten Signallaufzeit von etwa 500 ns wieder am Ausgang des FG an. Der Abschlusswiderstand R_2 reflektiert das Signal aber mit umgekehrten Vorzeichen, wodurch zu erklären ist, dass die Amplitude des gesamten Signals abnimmt (siehe Skizze). Nun wird das ankommende Signal vom Abschlusswiderstand R_1 reflektiert und kommt wieder bei R_2 an, wo es nochmals mit umgekehrten Vorzeichen reflektiert wird. Daher nimmt auch bei der nächsten Stufe die Gesamtamplitude ab. Die Reflexionen

zwischen R_1 und R_2 setzen sich in der Folge solange weiter fort, bis das Ausgangssignal des FG auf die negative Flanke wechselt. Dann setzen sich die Reflexionen zwischen R_1 und R_2 genau umgekehrt fort, so dass sich das Signal nun „von unten“ der Nulllinie annähert.

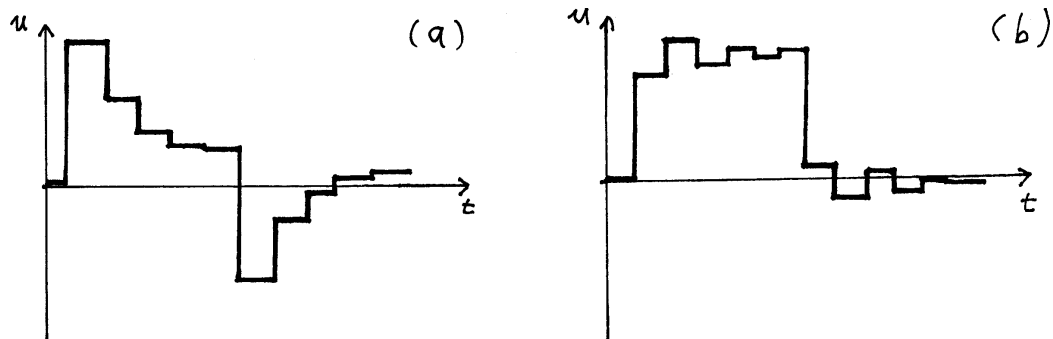


Abb. 6: Beobachtete Signalverläufe in den Fällen (a) und (b).

Den Signalverlauf im Fall (b) können wir wie folgt deuten: Am Abschlusswiderstand R_2 findet wiederum eine vollständige Reflexion statt, diesmal aber ohne Änderung des Vorzeichens. Daraus folgt, dass die erste Spannungsstufe nach der Signallaufzeit von etwa 500 ns „nach oben“ weist, die Gesamtamplitude also vergrößert. Nun wird das Signal an R_1 mit umgekehrten Vorzeichen reflektiert, um dann wieder an R_2 zurückgeworfen zu werden. Daher weist die zweite Spannungsstufe „nach unten“. Beim nächsten Signaldurchlauf wird das Vorzeichen an R_1 wieder umgekehrt, so dass die nächste Stufe „nach oben“ weist. Dieser wechselseitige Verlauf setzt sich nun solange fort, bis das Signal am FG die Flanke wechselt. Dann sind die Effekte genau umgekehrt, so dass sich das Signal um die Nulllinie herum bewegt.

3.4. Reflexionskoeffizient

Zur Bestimmung des Reflexionskoeffizienten verwenden wir die selbe Schaltung wie im vorherigen Versuchsteil. Am FG liegt wieder eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 100 kHz und einer Amplitude von 4 V an. Den Leitungsanfang schließen wir mit $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ab, so dass hier praktisch keine Reflexionen vorliegen. Wir betrachten nun auf dem Oszilloskop das Ausgangssignal des FG und bestimmen für zehn verschiedene Abschlusswiderstände R_2 zwischen $1 \text{ }\Omega$ und $10 \text{ k}\Omega$ die Amplitude der ersten Spannungsstufe U_1 . In Kenntnis der Eingangsamplitude von $U_0 = 4 \text{ V}$ können wir dann den Reflexionskoeffizienten ρ bestimmen:

$$\rho = \frac{U_1}{U_0}$$

Als Fehler für U_1 nehmen wir 0,05 V an, was aus der Anzeigegenauigkeit am Oszilloskop resultiert. Für U_0 gilt gemäß der Einstellungsgenauigkeit am FG ein Fehler von 0,1 V. Damit können wir den Größtfehler von ρ gemäß Fehlerfortpflanzung bestimmen:

$$\Delta \rho = \left| \frac{\partial \rho}{\partial U_1} \right| \cdot \Delta U_1 + \left| \frac{\partial \rho}{\partial U_0} \right| \cdot \Delta U_0 = \frac{\Delta U_1}{U_0} + \frac{U_1 \cdot \Delta U_0}{U_0^2}$$

Die erwarteten Werte für die Reflexionskoeffizienten ρ_{theo} bestimmen wir gemäß Gleichung (18). Unsere gemessenen und berechneten Werte zeigt Tabelle 2.

R_2 / Ω	U_1 / V	ρ	ρ_{theo}
10	$-2,68 \pm 0,05$	$-0,67 \pm 0,03$	-0,67
20	$-1,80 \pm 0,05$	$-0,45 \pm 0,02$	-0,43
30	$-1,12 \pm 0,05$	$-0,28 \pm 0,02$	-0,25
40	$-0,52 \pm 0,05$	$-0,13 \pm 0,02$	-0,11
50	$-0,16 \pm 0,05$	$-0,04 \pm 0,01$	0,00
100	$1,12 \pm 0,05$	$0,28 \pm 0,02$	0,33
500	$3,12 \pm 0,05$	$0,78 \pm 0,03$	0,82
2000	$3,60 \pm 0,05$	$0,90 \pm 0,04$	0,95
5000	$3,68 \pm 0,05$	$0,92 \pm 0,04$	0,98
10000	$3,84 \pm 0,05$	$0,96 \pm 0,04$	0,99

Tab. 2: Gemessene Spannungen U_1 für verschiedene Abschlusswiderstände R_2 sowie daraus berechnete Reflexionskoeffizienten ρ und theoretische Reflexionskoeffizienten ρ_{theo} .

Wir tragen nun die Reflexionskoeffizienten ρ und ρ_{theo} in einem Diagramm über R_2 auf. Die Skala für R_2 ist dabei halb-logarithmisch. Das entsprechende Diagramm zeigt Abbildung 7. Wir erkennen, dass unsere gemessenen Reflexionskoeffizienten sehr gut mit den theoretischen Werten übereinstimmen. Die Messwerte liegen dabei jeweils leicht unterhalb der theoretischen Werte, was durch die Dämpfung in dem Kabel zu erklären ist. Wie eingangs erwähnt haben wir die Dämpfung in allen Versuchsteilen vernachlässigt, da sie bei den verwendeten Frequenzen kaum eine Rolle spielt. Da wir hier ein relativ langes Kabel verwendet haben, müssen wir trotz der niedrigen Frequenz von einer geringen Dämpfung ausgehen.

Die Abweichungen zwischen Theorie und Praxis sind bei kleinen Widerständen R_2 nicht so groß wie bei größeren Werten. Dies ist durch den Eingangswiderstand der verwendeten Widerstandsdekade zu erklären: Der geringe Eingangswiderstand der Dekade addiert sich zu den eingestellten Widerständen, so dass wir bei kleinen R_2 tatsächlich einen etwas größeren Widerstand vorliegen haben. Da der Reflexionskoeffizient bei wachsendem Widerstand größer wird, wird die Dämpfung zu einem gewissen Teil kompensiert. Bei größeren Widerständen R_2 ist der Einfluss des Eingangswiderstandes verschwindend gering, so dass die Dämpfung dann nicht kompensiert wird und die Differenz zwischen Messwert und theoretischem Wert größer ist.

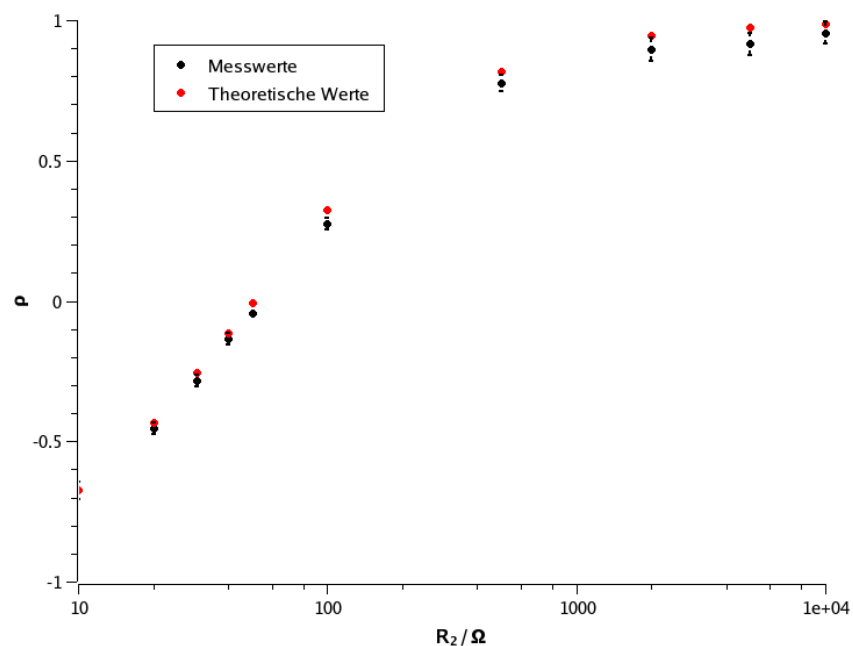


Abb. 7: Gemessene und erwartete Reflexionskoeffizienten ρ über verschiedenen Widerständen R_2 .

4. Anhang

4.1. Literatur

- [1] Skript zum Anfängerpraktikum Physik II, CvO Universität Oldenburg, Institut für Physik, Oktober 2005
- [2] dtv-Atlas Physik, Band 1 und 2, Deutscher Taschenbuch Verlag, 7. Auflage, August 2004

4.2. Abbildungsnachweis

- **Abb. 1:**
Skript zum Anfängerpraktikum Physik II, siehe [1]
- **Abb. 2:**
Skript zum Anfängerpraktikum Physik II, siehe [1]
- **Abb. 3:**
Skript zum Anfängerpraktikum Physik II, siehe [1]
- **Abb.4:**
Skript zum Anfängerpraktikum Physik II, siehe [1]]
- **Abb.5:**
Skript zum Anfängerpraktikum Physik II, siehe [1]]