

# Praktikum Hochfrequenztechnik, Teil 1

## Impulsreflektometrie

SoSe 2017

### 1 Einleitung

In diesem Versuch werden verschiedene Störstellen auf Leitungen mithilfe der Methode der Impulsreflektometrie (engl. time-domain reflectometry, TDR) analysiert.

Die Impulsreflektometrie ist ein Messverfahren, mit dem von einer Störstelle (z.B. Steckerübergang oder Leitungsstoßstelle) neben der Größe des Reflexionsfaktors auch ihre örtliche Lage bestimmt werden kann.

**Prinzip:** Ein auf die zu untersuchende Schaltung gegebener Spannungssprung wird an jeder Diskontinuität (Störstelle, z.B. Stecker mit Reflexion, Leitungsübergang mit anderem Leitungswellenwiderstand...) mehr oder weniger stark reflektiert. Das Eintreffen des reflektierten Spannungssprungs wird am Eingang der Schaltung mit einem Oszilloskop verfolgt. Aus der Laufzeit lässt sich der Ort der Diskontinuität und aus der Form, Größe und Polarität des reflektierten Signals die Art der Diskontinuität und die Größe ihres Reflexionsfaktors bestimmen.

### 2 Theorie

Die Grundidee wird zunächst an einem einfachen Beispiel veranschaulicht.

#### 2.1 Verlustlose Leitung mit dem Wellenwiderstand $Z_L$ , Abschluss mit einem beliebigen reellen Widerstand $R$

Eine verlustlose Leitung mit dem Wellenwiderstand  $Z_L$  soll mit einem beliebigen reellen Widerstand  $R$  abgeschlossen sein (Bild 1).

Zum Startpunkt sei die erzeugte Spannung am Anfang:

$$\frac{U_0}{2}\epsilon(t) \quad \bullet \text{---} \circ \quad \frac{U_0}{2s}$$

Da es sich um eine Sprungfunktion handelt, wird diese zur Vereinfachung im Laplace-Bereich betrachtet. Nach einer Laufzeit  $t_1 = l/c_0$  wird die Spannungsamplitude am Ende

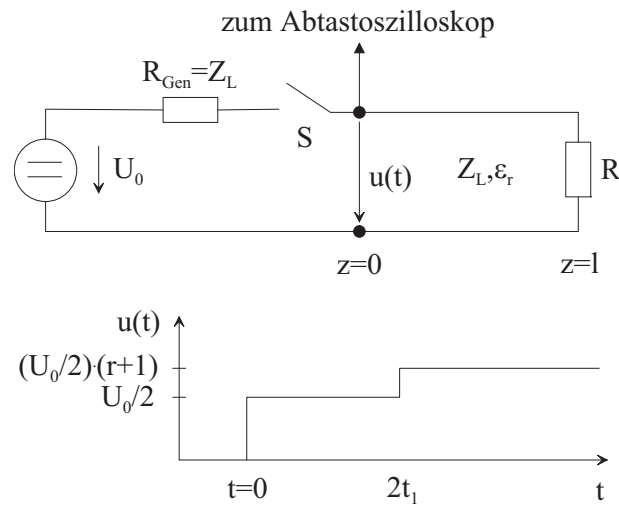


Abbildung 1: Sprungfunktion auf einer Leitung.

reflektiert. Bekanntlich beträgt der Reflexionsfaktor am Leitungsende

$$r = \frac{R - Z_L}{R + Z_L}.$$

Soll der Spezialfall  $R = Z_L \Leftrightarrow r = 0$  (Anpassung) vorliegen, so beobachtet man am Anfang keine Veränderung der Spannungsamplitude. Ist das nicht der Fall, dann ergibt sich nach einer weiteren Zeitdauer  $t_1$  die Spannungsamplitude am Anfang als:

$$U_a = \frac{U_0}{2s} + U_r \quad \text{mit} \quad U_r = r \frac{U_0}{2s} \exp(-2t_1 s)$$

Die Spannungsamplitude ändert sich um den Faktor  $1 + r$ . Damit sieht man, dass anhand der Messung der Spannungsamplitude am Anfang einer Leitung, eine Störung an einer beliebigen Stelle erkannt werden kann. Die Art der Störung kann je nach der Art des Spannungsverlaufs durch ein i.A. RLC-Ersatzschaltbild modelliert werden und ihre genaue Stelle kann durch Berücksichtigung vom Zeitpunkt der Spannungsänderung bestimmt werden.

## 2.2 Verlustlose Leitung mit dem Wellenwiderstand $Z_L$ , abgeschlossen mit einem beliebigen komplexen Widerstand $z$

Der genaue Verlauf des Reflexionsoszillogramms lässt sich für beliebige Abschlusswiderstände rechnerisch durch Multiplikation von  $\underline{r}(\underline{s})$  [ $\underline{r}(\underline{s})$ : Reflexionsfaktor des Abschlusswiderstandes in Abhängigkeit von der komplexen Kreisfrequenz  $\underline{s} = \sigma + j\omega$ ] mit der Laplace-Transformierten des Sprungimpulses und anschließender Rücktransformation dieses Produktes in den Zeitbereich ermitteln. Für die Serienschaltung von Spule  $L$  und Widerstand  $R$  nach Bild 2 lässt sich das Reflexionsoszillogramm folgendermaßen berechnen:

Die Ausgangsspannung des Impulsgenerators  $u_1(t)$

$$u_1(t) = \frac{U_0}{2} \cdot \epsilon(t) \tag{1}$$

mit  $\epsilon(t) = 0$  für  $t < 0$  und  $\epsilon(t) = 1$  für  $t \geq 0$  ergibt sich durch Laplacetransformation folgende Gleichung 2:

$$\underline{U}_1(\underline{s}) = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{1}{\underline{s}} \quad (2)$$

Damit ergibt sich die Spannung am Abtasttor  $\underline{U}(\underline{s})$

$$u(t) = u_1(t) + u_r(t) \quad (3)$$

$$\underline{U}(\underline{s}) = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{1}{\underline{s}} (1 + \underline{r}(\underline{s}) \cdot e^{-2t_1 \underline{s}}) \quad (4)$$

mit  $\underline{r}(\underline{s}) = \frac{\underline{s}L + R - Z_L}{\underline{s}L + R + Z_L}$  wie folgt im  $\underline{s}$ -Bereich

$$\underline{U}(\underline{s}) = \frac{U_0}{2} \left( \frac{1}{\underline{s}} + \frac{\underline{s} + \frac{R - Z_L}{L}}{\underline{s}(\underline{s} + \frac{R + Z_L}{L})} \cdot e^{-2t_1 \underline{s}} \right) \quad (5)$$

Im Zeitbereich ist  $u(t)$  damit

$$u(t) = \frac{U_0}{2} \cdot \left( \epsilon(t) + \left[ \frac{R - Z_L}{R + Z_L} + \frac{2Z_L}{R + Z_L} \cdot e^{-(t-2t_1)/\tau} \right] \epsilon(t - 2t_1) \right) \quad (6)$$

mit  $\tau = \frac{L}{R + Z_L}$

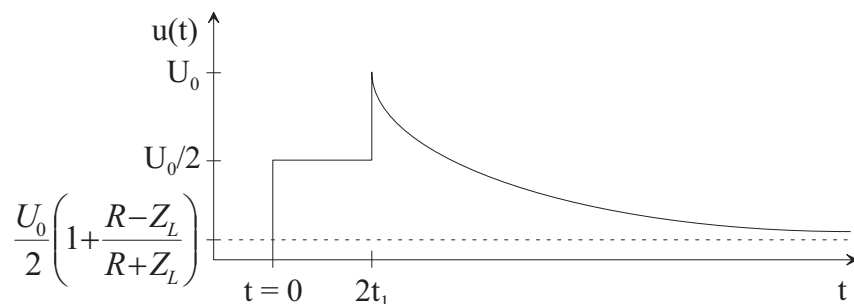
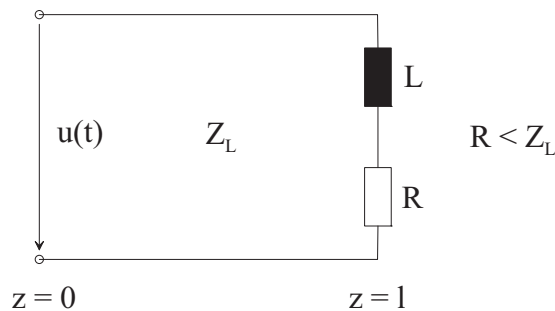


Abbildung 2: Reflexionsoszillogramm für Reihenschaltung von Spule und Widerstand.

Die Reflexionsoszillogramme für verschiedene Abschlusswiderstände sind in Bild 3 zusammengefasst.

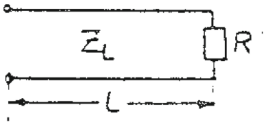
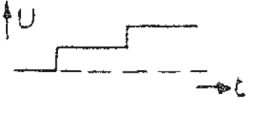
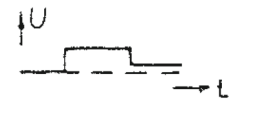

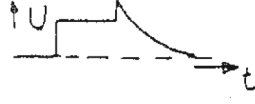
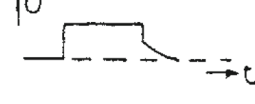
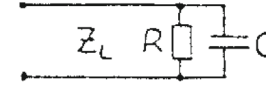
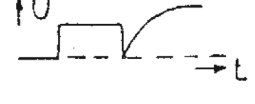
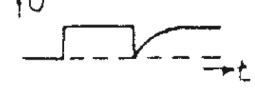
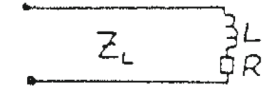
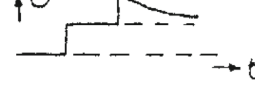
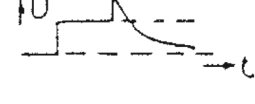
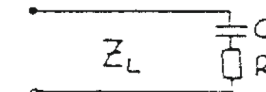
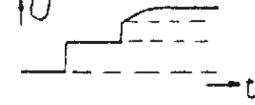
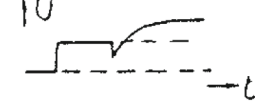
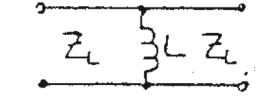
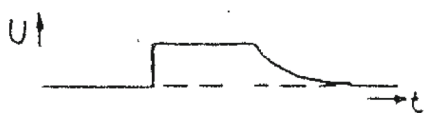
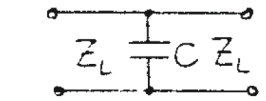

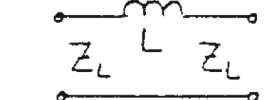

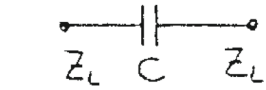
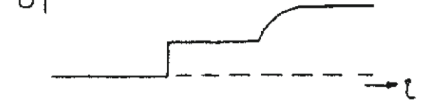
	$R > Z_L$	$R < Z_L$
		
		
		
		
		
		
		
		
		

Abbildung 3: Verlauf der reflektierten Spannung.

## 2.3 Verlustlose Leitung mit mehreren Stoßstellen

Nun soll die verlustlose Leitung mehrere Stoßstellen (mit reellen Reflexionsfaktoren) aufweisen (Bilder 4 und 5).

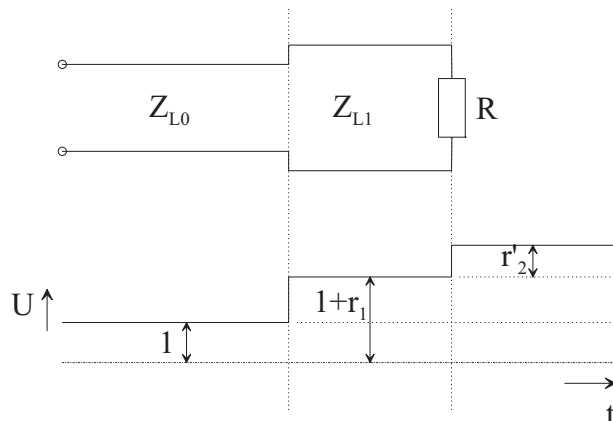


Abbildung 4: Spannungsverlauf für Mehrfachreflexionen.

In diesem Fall ist nur die Reflexion  $r_1$  der ersten Stoßstelle direkt angezeigt. Zur Berechnung des zweiten Reflexionsfaktors  $r_2$  dient das Gitterdiagramm nach Bild 5.

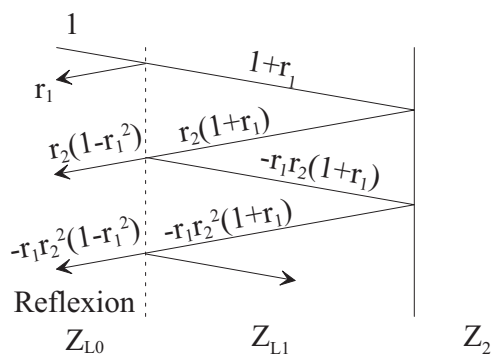


Abbildung 5: Gitterdiagramm für Mehrfachreflexion.

Eine Welle mit der normierten Amplitude 1 kommt auf die erste Stoßstelle  $Z_{L0}$ ,  $Z_{L1}$  und wird mit

$$r_1 = \frac{(Z_{L1} - Z_{L0})}{(Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (7)$$

reflektiert. Die Amplitude der weiterlaufenden Welle ist mit  $1 + r_1$  gegeben. In Folge der zweiten Fehlanpassung  $Z_{L1}$ ,  $Z_2$  wird sie mit

$$r_2 = \frac{(Z_2 - Z_{L1})}{(Z_2 + Z_{L1})} \quad (8)$$

reflektiert. Nach erneuter Teilreflexion an der ersten Stoßstelle beträgt die Amplitude der zweiten, rücklaufenden Teilwelle

$$r'_2 = r_2 (1 - r_1^2). \quad (9)$$

Dieser Wert wird auf dem Reflexionsoszillogramm in Bild 4 angezeigt. Da sich  $r_1$  und  $r_2'$  aus Bild 4 ablesen lassen, ist somit auch  $r_2$  bekannt.

### 3 Durchführung und Messung

Zur Veranschaulichung des Messaufbaus soll die Blockschaltung eines Impulsreflektometers mit Abtastoszilloskop betrachtet werden (Abb. 6). Es enthält einen Triggeregenerator, der einerseits das Abtastoszilloskop triggert, andererseits über eine Verzögerungsschaltung den Sprungfunktionsgenerator steuert. Die abgegebene Sprungspannung gelangt zum einen auf die Abtast-Halte-Schaltung, zum anderen nach der Laufzeit  $t_1$  auf das Messobjekt. Die am Messobjekt reflektierte Spannung addiert sich dann an der Abtastschaltung nach der Laufzeit  $2t_1$  zu der anliegenden Sprungspannung.

Das Abtastoszilloskop besteht aus der Abtast-Halte-Schaltung und dem Vertikalverstärker sowie Baugruppen für die Zeitbasis und die Abtastimpulserzeugung. Die Zeitbasis enthält den langsamen und schnellen Sägezahngenerator sowie den Komparator, der bei Spannungsgleichheit den Abtastimpulsgenerator triggert. Die Ausgangsspannung des langsamen Sägezahngenerators wird dem x-Verstärker des Oszilloskops zugeführt.

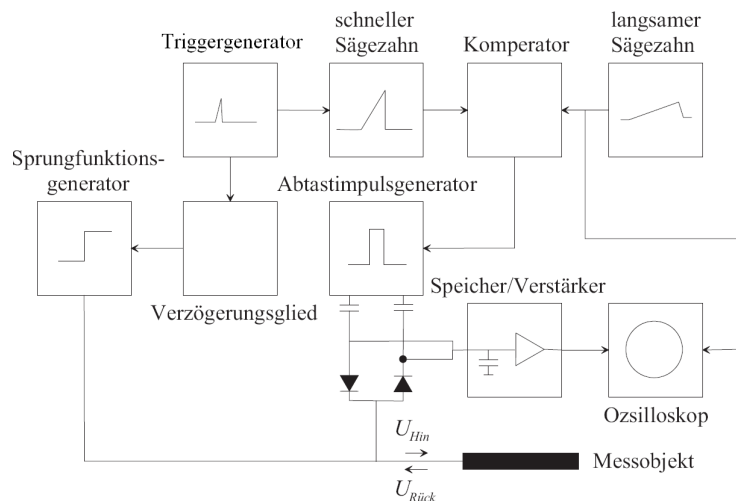


Abbildung 6: Blockschaltung eines Impulsreflektometers.

**Sprungfunktionsgenerator** Der steile Spannungssprung (engl. *step function*) wird nach Bild 7 mit einer Tunnelodiode erzeugt.

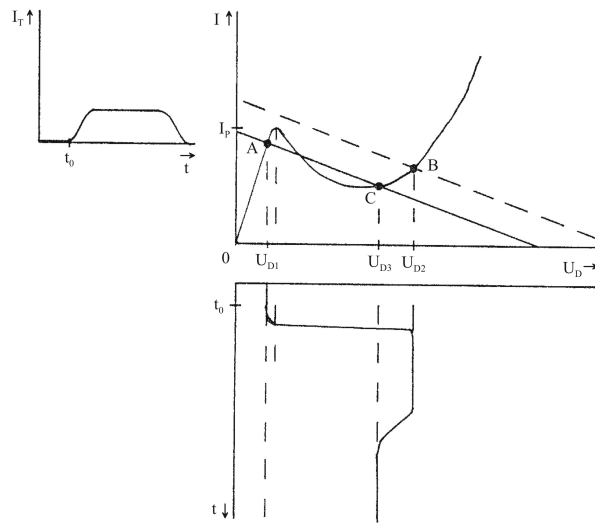


Abbildung 7: Erzeugung eines steilen Spannungssprungs.

Dargestellt ist in der Mitte die statische Kennlinie einer Tunneldiode, die einen Teil mit negativer Spannung aufweist. Die Tunneldiode ist mit einem Lastwiderstand beschaltet, so dass sich bei einem bestimmten Ruhestrom der Arbeitspunkt  $A$  mit der Spannung  $U_{D1}$  einstellt. Fließt zum Zeitpunkt  $t = t_0$  der Triggerstrom  $I_T$  zusätzlich durch die Tunneldiode, springt die Spannung für  $I > I_P$  sehr schnell auf den Wert  $U_{D2}$  (Arbeitspunkt  $B$ ), die sich nach dem Abschalten des Triggerstroms auf den Wert  $U_{D3}$  (Arbeitspunkt  $C$ ) vermindert. Mit einem negativen Triggerstromimpuls kann der Arbeitspunkt  $A$  wieder erreicht werden. Der sehr schnelle Spannungssprung von  $A$  nach  $B$  (etwa 20 ps sind erreichbar) wird in einem Sprungfunktionsgenerator ausgenutzt.

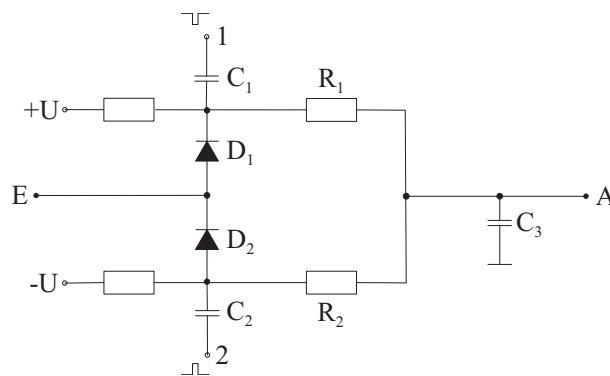


Abbildung 8: Prinzip der Abtast-Halte-Schaltung (engl. *sampling and hold*).

**Abtast-Halte-Schaltung** Das Prinzip der Abtast-Halte-Schaltung ist in Bild 8 gezeigt. Sie besteht aus schnellen Schottdioden  $D_1$  und  $D_2$  (Schottky-Dioden), Koppelkondensatoren  $C_1$  und  $C_2$ , Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  und der Speicherkapazität  $C_3$ . Das abzutastende Signal wird auf den Eingang  $E$  gegeben. Die Abtastdioden  $D_1$  und  $D_2$  sind im Ruhestand gesperrt. Zum Abtastzeitpunkt wird auf die Impulseingänge 1 und 2 jeweils

ein sehr schmaler negativer bzw. positiver Impuls gegeben, so dass die Dioden kurzzeitig durchschalten. Damit wird über  $R_1$  und  $R_2$  der Haltekondensator  $C_3$  auf einen der Eingangsspannung proportionalen Wert aufgeladen, der dann am Ausgang  $A$  anliegt.

**Abtastoszilloskop** Die Zeit- und damit die Ortsauflösung des TDR-Verfahrens ist abhängig von der Flankensteilheit des Spannungssprungs und von den Bandbreiten des zu messenden Systems. Die obere Frequenzgrenze üblicher Breitbandoszilloskope liegt bei einigen 100 MHz; eine größere Bandbreite und außerdem eine höhere Übersteuerungsfestigkeit besitzt das sog. Abtastoszilloskop (engl. *sampling oscilloscope*), bei dem nicht das gesamte Signal gemessen wird, sondern immer einzelne Zeitpunkte des Signals in regelmäßigen Abständen abgetastet wird, was eine periodische Wiederholung des Signals voraussetzt.

Das zu messende Signal muss sich immer wiederholen und wird von einem Abtastimpuls sehr geringer Dauer  $T$  in jeder Periode einmal abgetastet. Der Abtastzeitpunkt wird folgendermaßen festgelegt (siehe Abb. 9): Aus dem zu messenden Signal wird ein Triggerimpuls abgeleitet, der seinerseits einen schnellen Sägezahn auslöst. Stimmt die Spannung dieses schnellen Sägezahns mit einer Referenzspannung überein, wird der Abtastimpuls ausgelöst. Hat diese Referenzspannung eine Rampen- oder Treppenform, wird der Abtastimpuls von Periode zu Periode um einen konstanten Betrag verschoben. Der abgetastete Wert wird gespeichert und dem Vertikalverstärker des Oszilloskops zugeführt. Die Einhüllende der abgetasteten und gehaltenen Spannungswerte stellt dann das abzubildende Signal in einem transformierten Zeitmaßstab dar.

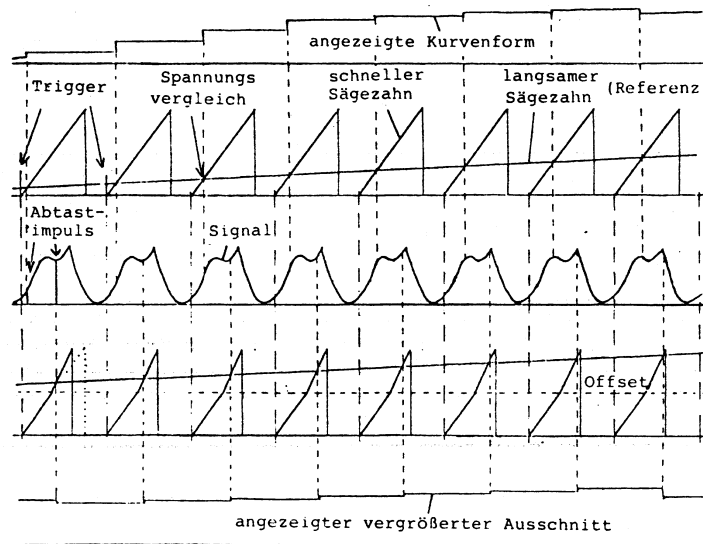


Abbildung 9: Prinzip des Abtastoszilloskops.

Die obere Frequenzgrenze des Abtastverfahrens ist abhängig von der Breite und vom genauen zeitlichen Einsatz des Abtastimpulses (z.Z. lassen sich mit Lawinentransistoren zur Rechteckimpulserzeugung und mit Speicherschaltioden zur Formung der Pulsflanken



Abtastimpulse mit einer Breite von ca. 25 ps erzeugen, woraus eine Grenzfrequenz von 18 GHz resultiert).

## 4 Aufgaben

### 4.1 Vorbereitungsaufgaben

Berechnen Sie für die beiden gezeigten Anordnungen in Bild 10 die Sprungantwort, und stellen Sie diese graphisch dar.

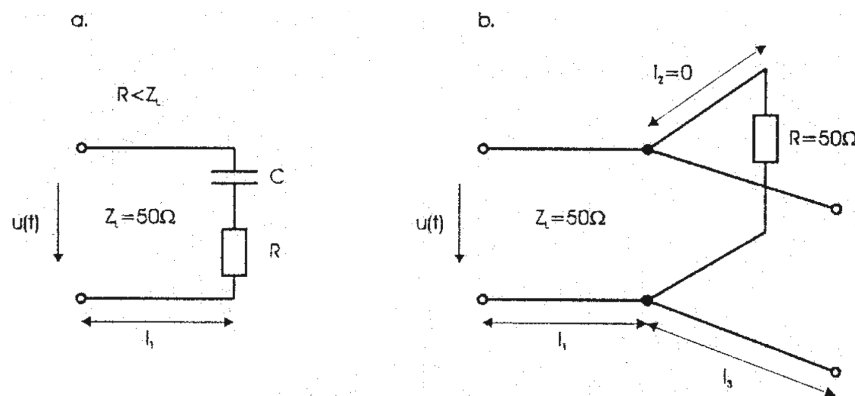


Abbildung 10: Verschiedene Leitungsabschlüsse

### 4.2 Versuchsaufgaben und Auswertung

1. Messen Sie die Eigenanstiegszeit  $t_r$  des Gerätes. Diese ist die Zeit, die ein Impuls benötigt, um von 10% auf 90% relativer Amplitude zu steigen.
2. Messen Sie die mechanische Länge eines Koaxialkabels. Führen Sie eine Leerlaufmessung durch und bestimmen Sie daraus die Signallaufzeit. Berechnen Sie anschließend die Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  des Kabeldielektrikums.
3. Bestimmen Sie die Sprungantwort eines Widerstands mit langen Anschlussdrähten, skizzieren Sie den Kurvenverlauf und bestimmen Sie aus dem Endwert und der Zeitkonstante  $\tau$  die Größen  $L$  und  $R$ .
4. Messen Sie die Sprungantwort einer Wellenleiterverzweigung und vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Theorie aus der Vorbereitungsaufgabe (b).