

Was sich nach der Laufzeit  $t_L$  am Ende der Leitung tut, hängt vom Lastwiderstand  $R_E$  (Bild 10.6) am Ende der Leitung ab:

- Für  $R_E = Z_W$  liegt *Anpassung* vor (s. Abschn. 6.5.3) und es wird die maximale Energie in den Lastwiderstand eingespeist; dies bedeutet, dass keine rücklaufende Spannungswelle entsteht.
- Für  $R_E \neq Z_W$  wird von der rücklaufenden Spannungswelle ein Teil der Energie, den die hinlaufende Spannungswelle zum Leitungsende transportiert hat, wieder zum Leitungsanfang zurücktransportiert. Man sagt, dass die hinlaufende Spannungswelle reflektiert wird, und spricht von einer **Reflexion (reflection)**.

Die rücklaufende Spannungswelle wird am Leitungsanfang wieder reflektiert, wenn  $R_i \neq Z_W$  ist; dabei entsteht eine weitere Spannungswelle, die sich der ursprünglichen hinlaufenden Spannungswelle überlagert und eine neue hinlaufende Spannungswelle bildet.

Was dann weiter geschieht, lässt sich mit Worten kaum noch anschaulich beschreiben. Zum Glück können wir mit Micro-Cap den Vorgang grafisch darstellen.

### Beispiel 10.1

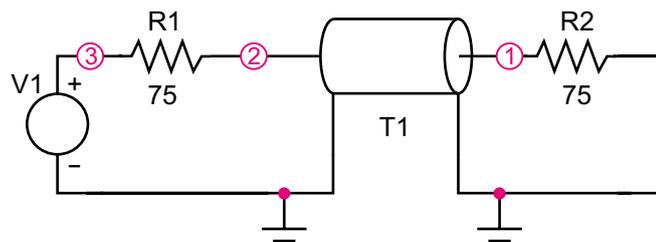
Wir wollen den Schaltvorgang nach Bild 10.6 mit Micro-Cap simulieren und dabei unterschiedliche Belastungsfälle betrachten. Für die Leitung mit der Länge  $l = 100$  m sind die Beläge  $C' = 0,16 \mu\text{F}/\text{km}$  und  $L' = 0,9 \text{ mH}/\text{km}$  gegeben.

Zunächst zeichnen wir die Schaltung mit der Leitung, die unter dem Kennwort TLine bei **Passive Components** abgerufen werden kann.



⚠ Da Micro-Cap bei TLine keine durchgehende Verbindung zwischen Ein- und Ausgang vorsieht, sind zwei Schaltzeichen **Ground** erforderlich.

Pulse 0 60 0 10n 10n 12m 20m



Beim Platzieren der Leitung öffnet sich ein Fenster, in dem unter LEN die Leitungslänge in m sowie die Beläge eingetragen werden können: R ( $\Omega/\text{m}$ ), L (H/m), G (S/m) und C (F/m). Wir tragen also LEN=100 sowie L=0.9u und C=0.16n ein. Da wir für R und G keine Angaben machen, werden diese Werte zu null angenommen.

Bei der im Bild 8.15 beschriebenen Pulsquelle stellen wir  $V_1=0$ ;  $V_2=60$ ;  $TD=0$ ;  $TR=10n$ ;  $TF=10n$ ;  $PW=12m$  und  $PER=20m$  ein; die Quelle liefert also zunächst 12 ms lang die Spannung 60 V, was für unsere Untersuchungen ausreicht.

Zur Kontrolle berechnen wir mit der Gl. (10.11) den Wellenwiderstand  $Z_W = 75 \Omega$  und mit der Gl. (10.14) die Laufzeit  $t_L = 1,2 \mu s$ . Unsere Schaltung arbeitet also zunächst am Anfang und am Ende der Leitung bei Anpassung; dabei springt die Spannung am Anfang der Leitung bei  $t = 0$  auf 30 V (Spannungsteiler aus  $R_1 = 75 \Omega$  und  $Z_W = 75 \Omega$ ), und die Spannung am Ende der Leitung springt nach der Laufzeit bei  $t = 1,2 \mu s$  auf 30 V.

Für Leerlauf am Ende der Leitung ändern wir nun den Lastwiderstand und setzen  $R_2 = 1 \text{ G}\Omega (= 1000 \text{ M}\Omega)$ . Dabei wird die Spannung am Ende der Leitung reflektiert und die Summe der hin- und der rücklaufenden Welle ergibt bei  $t = 1,2 \mu s$  die Spannung  $u_2 = 60 \text{ V}$  am Ende der Leitung. Die 30 V der rücklaufenden Welle werden am Anfang der Leitung nach der doppelten Laufzeit bei  $t = 2,4 \mu s$  wirksam und ergeben bei  $t = 2,4 \mu s$  die Spannung  $u_1 = 60 \text{ V}$  am Anfang der Leitung.

Offensichtlich gibt es beim Einschalten der leer laufenden Leitung eine hinlaufende Stromwelle mit  $30 \text{ V} / 75 \Omega = 0,4 \text{ A}$ , die bei der Reflexion „gespiegelt“ wird; die rücklaufende Stromwelle  $-0,4 \text{ A}$  ergibt am Anfang der Leitung bei  $t = 2,4 \mu s$  den Strom 0.

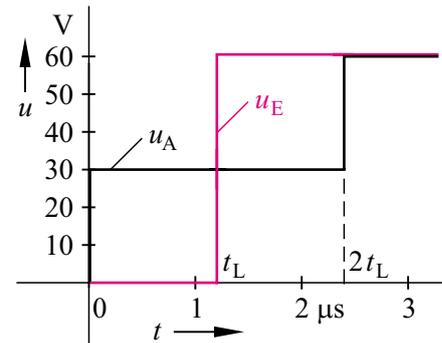


Bild 10.8 Spannungen beim Einschalten der leer laufenden Leitung für  $R_i = Z_W$

### 10.1.6 Reflexionsfaktor

Die Reflexion wird durch den **Reflexionsfaktor**  $r$  beschrieben, für den am Leitungsende gilt:

$$r_E = \frac{u_r}{u_h} = -\frac{i_r}{i_h} = \frac{R_E - Z_W}{R_E + Z_W} \quad (10.15)$$

Am Leitungsanfang gilt entsprechend:

$$r_A = \frac{u_h}{u_r} = -\frac{i_h}{i_r} = \frac{R_i - Z_W}{R_i + Z_W} \quad (10.16)$$

Bei Anpassung ist der Reflexionsfaktor  $r = 0$ . Grenzfälle der Reflexion sind der Leerlauf mit  $r = 1$  und der Kurzschluss mit  $r = -1$ . Beim Leerlauf wird die Spannungswelle unverändert reflektiert und beim Strom wird durch die Reflexion das Vorzeichen geändert.

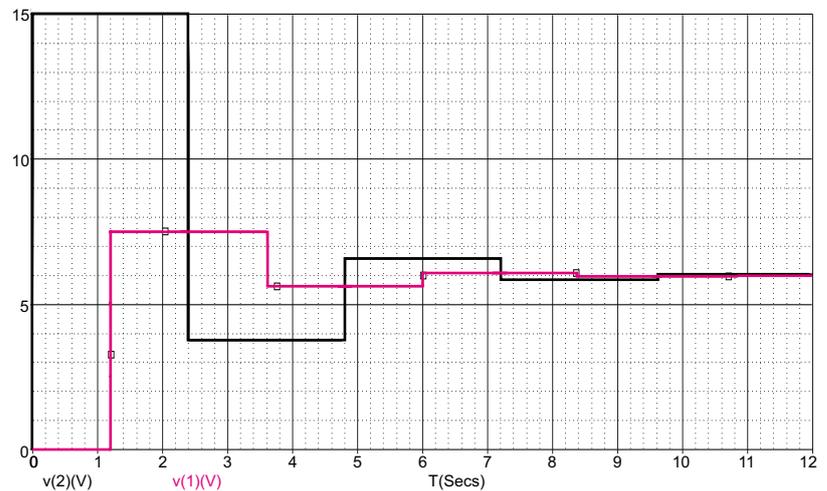
Beim Kurzschluss wird die Stromwelle unverändert reflektiert und bei der Spannung wird durch die Reflexion das Vorzeichen geändert.

Wenn sowohl der Abschlusswiderstand  $R_E$  der Leitung als auch der Innenwiderstand  $R_i$  der Quelle, mit dem die Leitung an ihrem Anfang abgeschlossen ist, vom Wellenwiderstand  $Z_W$  abweichen, dann entstehen Reflexionen sowohl am Anfang als auch am Ende der Leitung.

### Beispiel 10.2

Wir wollen den Schaltvorgang im Beispiel 10.1 für den allgemeinen Fall der verlustlosen Leitung untersuchen, bei dem  $R_i = R_1 = 225 \Omega$  und  $R_E = R_2 = 25 \Omega$  vom Wellenwiderstand  $Z_W$  abweichen.

Wir geben diese Widerstandswerte in die Schaltung ein und lassen uns nach der Analyse die Spannungen vom Programm PROBE anzeigen. Weil weder am Anfang noch am Ende der Leitung Anpassung vorliegt, werden die Spannungs- und die Stromwellen mehrfach reflektiert, bis sich schließlich der stationäre Zustand einstellt.



### 10.1.7 Verlustbehaftete Leitung

Bei der verlustbehafteten Leitung mit  $R' > 0$  und  $G' > 0$  weichen sowohl die Phasengeschwindigkeit als auch der Wellenwiderstand von den Werten ab, die man mit den Gln. (10.10 bzw. 10.11) erhält.

Wir werden uns im Abschnitt 10.2 mit Leitungen an Sinusspannung befassen und hierfür die Gleichungen sowohl für die Phasengeschwindigkeit als auch für den Wellenwiderstand angeben, die für eine verlustbehaftete Leitung gelten.