

Ergänzung zum Beitrag in FA 4/15, S. 382 ff. „Für HF-Messungen: Impulsgenerator mit Relais“

■ Herleitung und Zahlenbeispiel

Die im Nachhinein verwendeten Formelzeichen sind folgende:

$l \rightarrow$ Länge der Laufzeitleitung (LZL)

$C_B \rightarrow$ Kapazitätsbelag (z. B. in pF/m)

$u \rightarrow$ Impulsspannung

$i \rightarrow$ Impulsstrom

$\tau \rightarrow$ Impulsdauer

$Z_W \rightarrow$ Wellenwiderstand

$c_0 \rightarrow$ Vakuum-Lichtgeschwindigkeit

$VF \rightarrow$ Verkürzungsfaktor

Beim Schließen von S in Bild 1 startet eine Welle der Entladung am Leitungsanfang, läuft mit der Geschwindigkeit $VF \cdot c_0$ zum offenen Leitungsende, wird dort ohne Phasensprung reflektiert und läuft zurück zum Leitungsanfang, woraufhin der Impuls abrupt endet. Dessen Dauer entspricht somit der doppelten elektrischen Länge:

$$\tau = \frac{2 \cdot l}{VF \cdot c_0} \quad (1)$$

Im Folgenden wird von einer verlustfreien Laufzeitleitung (LZL) ausgegangen. Die gesamte elektrische Ladung und die gesamte Energie der aufgeladenen Leitung finden sich im elektrischen Impuls wieder. Dann gilt im Einzelnen:

Aufgeladene Kapazität

$$\text{Energie: } E = \frac{C}{2} \cdot U_1^2$$

$$E = \frac{C_B \cdot l \cdot U_1^2}{2} \quad (2)$$

$$\text{Ladung: } Q = C \cdot U_1$$

$$Q = C_B \cdot l \cdot U_1 \quad (3)$$

Elektrischer Impuls

$$\text{Energie: } E = P \cdot \tau$$

$$E = \frac{u^2}{Z_W} \cdot \tau \quad (4)$$

$$\text{Ladung: } Q = i \cdot \tau$$

$$Q = \frac{u}{Z_W} \cdot \tau \quad (5)$$

Tabelle 1: Elektrische Eigenschaften verschiedener Koaxialkabel

Kabeltyp	C_B [pF/m]	Z_W [Ω]	VF	Rechenwert
RG58/U	102	50	0,66	1,01
Aircom Plus	81	50	0,83	1,008
RG223U	101	50	0,67	1,015
RG59 B/U	67	75	0,67	1,01
Sat/BK Mini-Koax	55	75	0,85	1,052
RG62	42	93	0,83	0,972
TF25	198	25	0,71	1,054

Weil die Energien (Gleichung 2 und Gleichung 4) gleich sind, muss gelten:

$$\frac{C_B \cdot l \cdot U_1^2}{2} = \frac{u^2}{Z_W} \cdot \tau$$

Nach Umstellen folgt:

$$u^2 \cdot \tau = \frac{C_B \cdot l \cdot U_1^2 \cdot Z_W}{2} \quad (6)$$

Auch die Ladungen (Gleichungen 3 und Gleichungen 5) sind gleich:

$$C_B \cdot l \cdot U_1 = \frac{u}{Z_W} \cdot \tau$$

Nach Umstellen folgt:

$$u \cdot \tau = C_B \cdot l \cdot U_1 \cdot Z_W \quad (7)$$

Die Division von Gleichung 6 durch Gleichung 7 ergibt:

$$u = \frac{U_1}{2} \quad (8)$$

Die Impulsspannung u ist also stets halb so groß wie die zuvor angelegte Ladespannung U_1 .

Nach Einsetzen von Gleichung 8 und Gleichung 1 in Gleichung 4 lautet diese nun:

$$E = \frac{U_1^2}{4 \cdot Z_W} \cdot 2 \cdot \frac{l}{VF \cdot c_0} = \frac{U_1^2 \cdot l}{2 \cdot Z_W \cdot VF \cdot c_0} \quad (9)$$

Abermaliges Gleichsetzen der Energiewerte (Gleichung 2 und Gleichung 9) ergibt:

$$\frac{C_B \cdot l \cdot U_1^2}{2} = \frac{U_1^2 \cdot l}{2 \cdot Z_W \cdot VF \cdot c_0}$$

Nach dem Kürzen von l und U_1^2 sowie der 2 findet man den interessanten Zusammenhang:

$$C_B \cdot Z_W \cdot VF \cdot c_0 = 1 \quad (10)$$

Die Tabelle 1 enthält die Herstellerangaben für C_B , Z_W und VF einiger handelsüblicher Koaxialkabel sowie den daraus erhaltenen Rechenwert gemäß Gleichung 10.

■ Versuche mit digitalen Speicheroszilloskopen (DSO)

Der 5 ns lange Rechteckimpuls mit Anstiegs- und Abfallzeiten von 0,3 ns bis 0,4 ns wird von einem hochwertigen 1-GHz-Oszilloskop annähernd unverfälscht wiedergegeben (Bild 2 auf der nächsten Seite). Ein vom Hersteller mit 300 MHz deklarierter Modell sollte gemäß der Faustregel

$$t_{\text{on}} = t_{\text{off}} = \frac{0,35}{B}$$

eine Flankensteilheit (Übergang von 10 % auf 90 % des Endwerts) von 1,17 ns aufweisen.

Bild 3 auf der nächsten Seite zeigt, dass dies der Fall ist und die Herstellerangabe zutrifft. Auch die in Bild 2 auf der nächsten Seite etwa 5 ns bis 6 ns nach der Rückflanke auftretende kleine Delle in negativer Richtung wird vom 300-MHz-Oszilloskop noch erkennbar wiedergegeben. Ein 100-MHz-Gerät sollte

$$t_{\text{on}} = t_{\text{off}} = 3,5 \text{ ns}$$

aufweisen. Bild 4 auf der nächsten Seite deutet an, dass dieser Wert leicht übertroffen wird; aus der ablesbaren Steilheit von etwa 3 ns ergibt sich eine 3-dB-Bandbreite des Oszilloskops von rund 116 MHz. Auch die kleine Delle ist auf dem Schirm noch halbwegs auszumachen.

Das für Bild 5 auf der nächsten Seite benutzte 60-MHz-Modell zeigt gerade noch die Impulshöhe von 5 V an. Die Delle wird nicht mehr wiedergegeben. Die ablesbaren Werte für t_{on} und t_{off} von etwa 4 ns würden laut der Gleichung einer Analog-

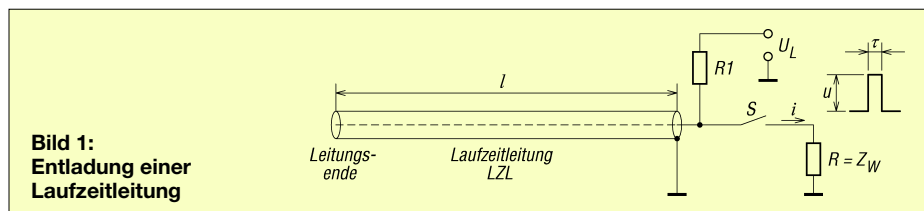


Bild 1:
Entladung einer
Laufzeitleitung

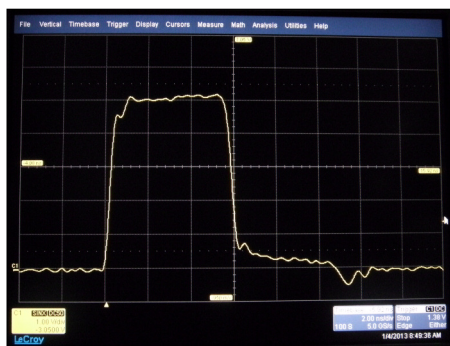


Bild 2: 5-ns-Impuls, gemessen mit 1-GHz-Oszilloskop

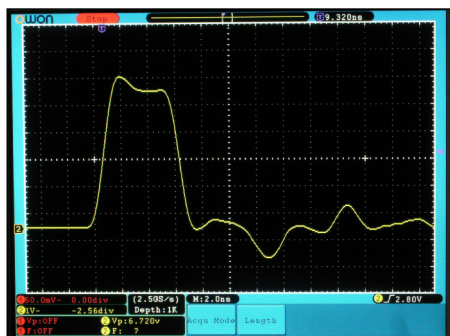


Bild 3: 5-ns-Impuls, gemessen mit 300-MHz-Oszilloskop



Bild 4: 5-ns-Impuls, gemessen mit 100-MHz-Oszilloskop

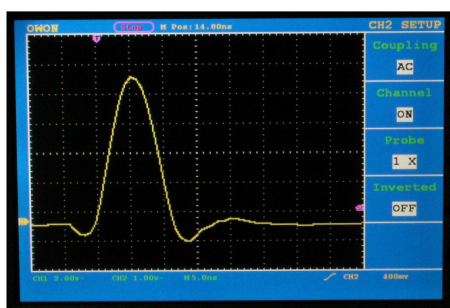


Bild 5: 5-ns-Impuls, gemessen mit 60-MHz-Oszilloskop

bandbreite von 87 MHz entsprechen, jedoch ist diese Zahl mit Vorsicht zu genießen. Insbesondere das dargestellte merkwürdige Unterschwingen vor Beginn der Anstiegsflanke deutet darauf hin, dass hier die Oszilloskop-interne Software für die Signalrekonstruktion an ihre Grenzen stößt.

Wer also ein Gefühl für Bandbreite und Impulstreue seines Oszilloskops gewinnen möchte, kann den vorgestellten Rechteck-generator hierzu einsetzen. Die Länge der Laufzeitleitung sollte dabei variiert werden, um Impulse von etwa konstanter Flankensteilheit, aber verschiedener Dauer, zu erzeugen. Dann kann beobachtet werden, was die analogen Y-Verstärker, die Abtastrate des A/D-Umsetzers und die Software des Oszilloskops aus dem Testsignal machen.

Aufbau

Die Bilder 6 und 7 zeigen die Bestückungs- und Leiterzugseite der HF-Platine sowie deren Beschaltung und die eingesetzten Bauteile.

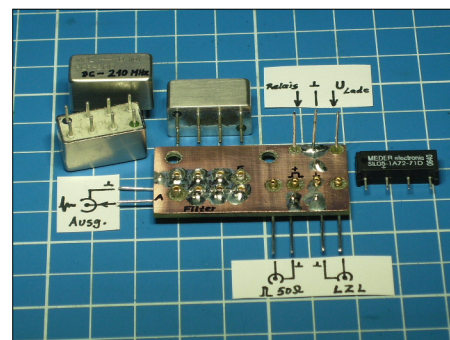


Bild 6: HF-Platine, Steckseite

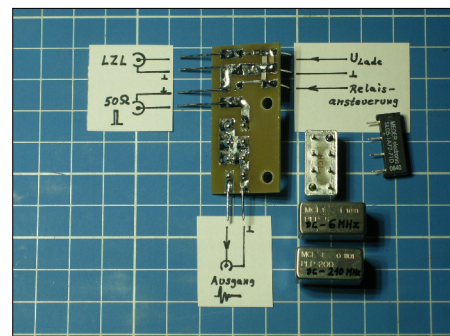


Bild 7: HF-Platine, Leiterzugseite