

1 | Ausbreitung von Signalen auf Leitungen

Angelo Brade^{*1} and Jonas Wortmann^{†1}

¹Rheinische Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn

August 28, 2024

^{*}s72abrad@uni-bonn.de

[†]s02jwort@uni-bonn.de

Contents

1	Einleitung	1
2	Theorie	2
3	Voraufgaben	4
3.1	A	4
3.2	B	4
3.3	C	4
3.4	D	4
4	Auswertung	5
4.1	Versuchsaufgabe 1: Differenzierglied	5
4.2	Versuchsaufgabe 2: Impulse auf Kabeln	5
4.3	Versuchsaufgabe 3: Leitungsabschluss, Verzögerungszeit . .	6
4.4	Versuchsaufgabe 4: Klippkabel, Dämpfung	8

1 Einleitung

In diesem Versuch werden Koaxialkabel behandelt und ihre Eigenschaften behandelt. Die Reflexionseigenschaften innerhalb von Koaxialkabeln sollen verstanden, sowie die Verzögerungszeit eines Kabels gemessen werden. Zudem soll das Rechtecksignal eines Hochpasses differenziert werden.

2 Theorie

Eine Doppelleitung (Hin- und Rückleiter), deren elektrische Eigenschaften längs der ganzen Strecke gleichbleiben, nennt man homogene Leitung. Koaxialkabel sind homogene Leitungen und bestehen aus einem leitenden Draht in der Mitte, darum ein Dielektrikum und wieder darum ein Geflecht aus einem leitenden Material welches Strahlung abschirmt. Das ganze Kabel ist isoliert.

Kabel können auch näherungsweise über eine Kette von LC-Gliedern dargestellt werden. Hier verteilt sich die gesamte Induktivität und Kapazität über das gesamte Kabel. Ein Ersatzschaltbild für die Wellenausbreitung in einem Leiter ist Der Wellenwiderstand eines

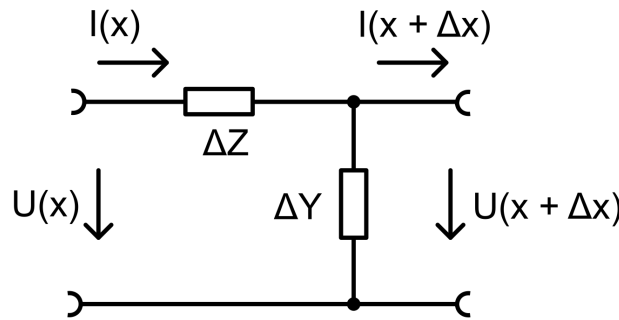


Figure 1: Ersatzschaltbild zur Wellenausbreitung; Abbildung 1.3 [1]

Kabels ist definiert als

$$Z = \frac{U_h(x)}{I_h(x)} = \frac{U_r(x)}{-I_r(x)}, \quad (2.1)$$

mit $_h$ der Hinrichtung und $_r$ der Rückrichtung. Im verlustfreien Fall ist $Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$, also rein reell. Für ein Koaxialkabel mit Innenradius R_i und Außenradius R_a gilt

$$Z = Z_{\text{frei}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}{2\pi}, \quad (2.2)$$

wobei $Z_{\text{frei}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \Omega$ der Wellenwiderstand des Vakuums ist.

Es existieren drei verschiedene wichtige Möglichkeiten für den Abschlusswiderstand in einer Leitung.

- Angepasster Abschluss: $R_A = Z, r = 0, s = 1, m = 1$
- Offene Leitung: $R_A = \infty, r = +1, s = \infty, m = 0$

– Kurzschluss: $R_A = 0, r = -1, s = \infty, m = 0$

Hier beschreiben R_A den Abschlusswiderstand, r den Reflexionskoeffizienten, s das Stehwellenverhältnis und m den Anpassungsfaktor.

3 Voraufgaben

3.1 A

Um große Verzögerungszeiten zu erreichen muss eine kleine Phasengeschwindigkeit sichergestellt werden, entsprechend große Permeabilität und Permittivität.

3.2 B

Wird die Verzögerungszeit über die Phasengeschwindigkeit geändert, so ändert sich auch der Wellenwiderstand, da diese Größen verschiedene Proportionalitäten besitzen

$$v_{\text{ph}} \propto \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad Z \propto \sqrt{\frac{L'}{C'}}. \quad (3.1)$$

Das Aufwickeln des Innenleiters um einen Ferritkern damit die Induktivität des Kabels gesteigert wird ändert den Wellenwiderstand nicht.

3.3 C

Sei ein Kabel abgeschlossen mit $R_A = Z$, findet keine Reflexion statt. Alle Energie, die am Eingang des Kabels einläuft, wird am Kabelende vollständig an den Verbraucher R_A abgegeben, da dieser wie eine Fortsetzung des Kabels aussieht. Der Eingangswiderstand ist hier also unabhängig von der Länge des Kabels.

3.4 D

Sei ein verlustfreier idealer Leiter mit den Eigenschaften $\frac{R_A}{R_I} = 2.3$, $\varepsilon_r = 1.5$ und $\mu_r = 1.5$. Dann ist die Phasengeschwindigkeit

$$v_{\text{ph}} = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c_0}{1.5} \approx 1.93 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}, \quad (3.2)$$

der Wellenwiderstand

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 \ln^2(R_a/R_i)}{\varepsilon_r \varepsilon_0 4\pi^2}} \approx 49.94 \Omega \quad (3.3)$$

und die Verzögerung

$$\Delta = \frac{1}{v_{\text{ph}}} = \frac{1.5}{c_0} \approx 5.2 \times 10^{-9} \text{ s m}^{-1} \approx 5.2 \text{ ns m}^{-1}. \quad (3.4)$$

4 Auswertung

4.1 Versuchsaufgabe 1: Differenzierglied

Wir erzeugen Impulse, indem wir ein Rechtecksignal mithilfe eines Differenzierglieds ableiten. Es sind 200 kHz bei 10 V eingestellt. Ein Ausschnitt ist in Abb. 2 gezeigt. Wenn wir nun den eingebauten 2.2

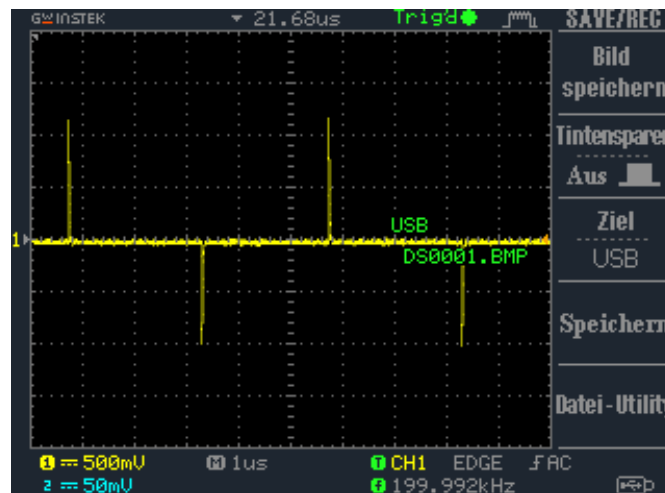


Figure 2: Impulse als Ableitung des Rechtecksignals

k Ω Widerstand verwenden, sehen wir eine deutliche Verkleinerung des Signals (betrachte die gelbe Skalar: 50 mV im Vergleich zu 500 mV von zuvor). Dieses ist wieder in Abb. 3 dargestellt. Zusätzlich können wir eine Abklinkzeit beobachten. Dies ist auch plausibel, da Widerstände Dämpfen, sowie die Konstruktion nicht mehr annähernd Verlustfrei machen und so eine sichtbare Verzögerung/Abklinkzeit hinzukommt.

4.2 Versuchsaufgabe 2: Impulse auf Kabeln

Es wird eine Schaltung nach Abb. 4 aufgebaut, um Impulse an beiden Enden hin- und herlaufen zu lassen. An dem Signalgenerator stellen wir 100 kHz und 20V ein. Bei dem Ursprungssignal sehen wir, dass es mit einem größeren Peak und dann mit kleineren Peaks nachhallt. Das zweite Signal, welches durch die Kabel gedämpft wird, hier in blau in Abb. 5, zieht um einen Versatz dem Ursprungssignal nach und beinhaltet zusätzlich die rückläufige Welle. So lassen sich pro Ursprungssignal, zwei weitere Peaks dem blauen Signal entnehmen. Die rückläufige Welle entsteht aufgrund des offenen Leiter-Endes, welches als Glanzfläche, die einlaufende Welle phasengleich reflektiert. Einen Abstieg der Amplituden lässt sich aufgrund der Dämpfung - des Widerstands im Kabel - erklären.

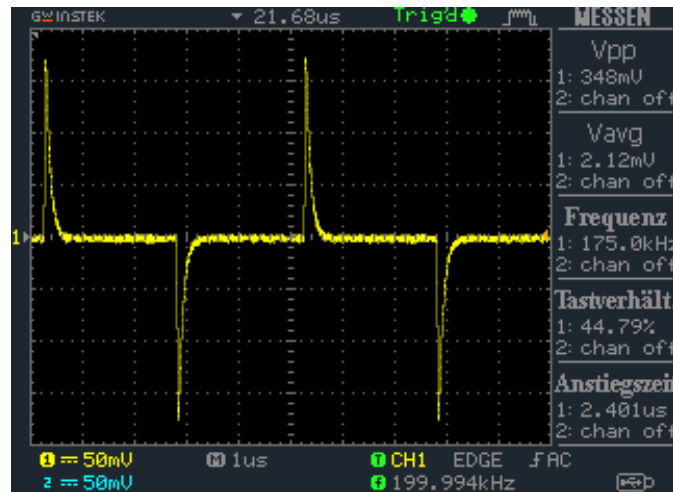


Figure 3: Impulse mit Widerstand

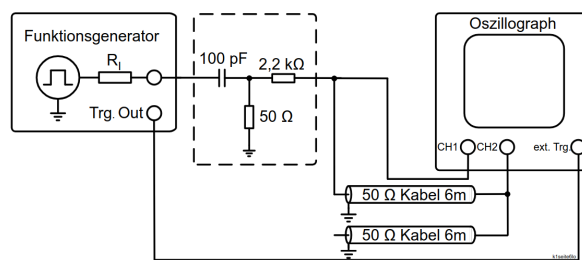


Figure 4: Schaltung mit offenen Enden

4.3 Versuchsaufgabe 3: Leitungsabschluss, Verzögerungszeit

Zur Untersuchung verschiedener Leitungsabschlüsse wird die Schaltung nach Abb. 6 konstruiert.

Vorher ist hierbei das Verzögerungskabel offen. Wir erhalten die in Abb. 7 gezeigte Spannung. Hierbei ist klar der eigentliche Impuls, sowie die Nachschwingung (zweiter Peak) zu erkennen.

Schließen wir nun das Kabel mit einem $50\ \Omega$ ab, so können wir in Abb. 9 erkennen, dass es keine Nachschwingung gibt und das Kabel aus der eigenen Sicht unendlich weitergeführt wird.

Lassen wir nun das Kabel in einem Kurzschluss enden, so kann man in Abb. 11 die rücklaufende gegenphasige Nachschwingung erkennen.

Diese gegenphasige Nachschwingung ist aufgrund des kleineren Widerstandes zu erklären, da bei einem Kurzschluss der Widerstand

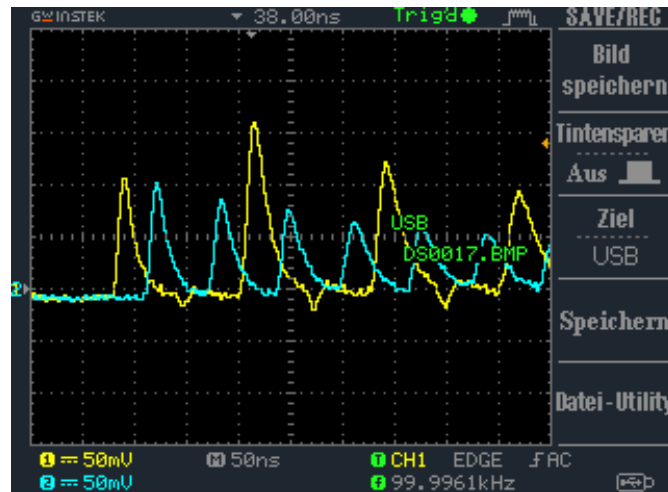


Figure 5: Schaltung mit offenen Enden

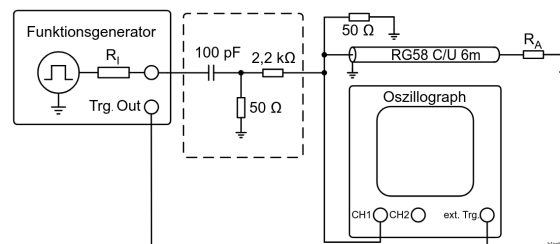


Figure 6: Schaltung mit offenen Enden

praktisch Null und somit kleiner dem Wellenwiderstand ist.

Variieren wir nun die Frequenz, so erhalten wir mit einer kleineren Frequenz (2 MHz) Abb. 13 und mit einer höheren Frequenz (2.7MHz) Abb. 14

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Abstand der Impulse sich verkleinert und die Abstände zwischen einem Einzelnen Impuls und der korrespondierenden Nachschwingung gleich bleibt. Dies ist zu erwarten, da die Erhöhung der Frequenz einfach mehr Impulse produziert. Andererseits ändert sich der Abstand zwischen den Nachschwingungen und dem Ursprungssignal nicht, da die Nachschwingung, in Relation zu dem Ursprungssignal, unabhängig von der Frequenz ist. Anders gesagt, die Nachschwingung wird von der Frequenzänderung im gleichen Maße verschoben, wie der Impuls selber, sie bleiben also in Relation zu einander gleich.

Den Abbildungen kann man eine Zeitdifferenz von 64(4) ns, zwischen Impuls und Nachschwingung, entnehmen. Da das Signal das 6m lange

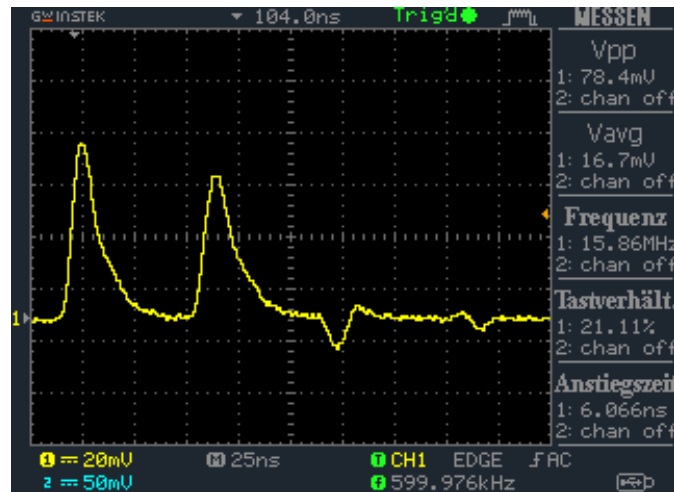


Figure 7: Einzelner Impuls mit Nachschwingung

Kabel zweimal durchlaufen muss, erhalten wir als Verzögerungszeit 5.3(3) ns. Dies deckt sich mit dem Literaturwert von 5.0(1) ns gut.

Mit einem Abschluss durch einen Wellenwiderstand würden wir nun keine Nachschwingung erwarten, da die Energie der Schwingung vollständig im Widerstand absorbiert wird. Diese Vermutung wurde getestet und in Abb. 15 gezeigt. Unsere Vermutung lässt sich mit der Abb. bestätigen.

4.4 Versuchsaufgabe 4: Klippkabel, Dämpfung

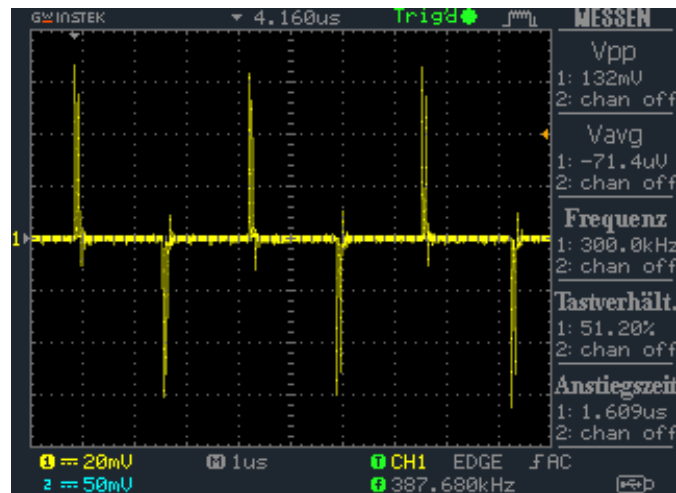


Figure 8: Mehrere Impulse mit Nachschwingung

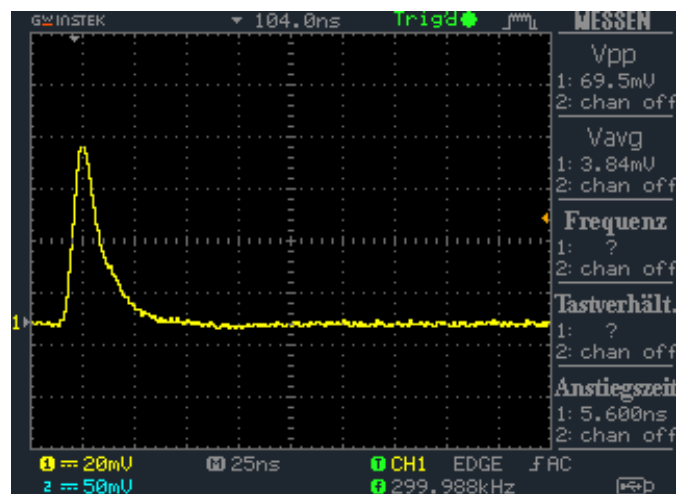


Figure 9: Einzelner Impuls ohne Nachschwingung

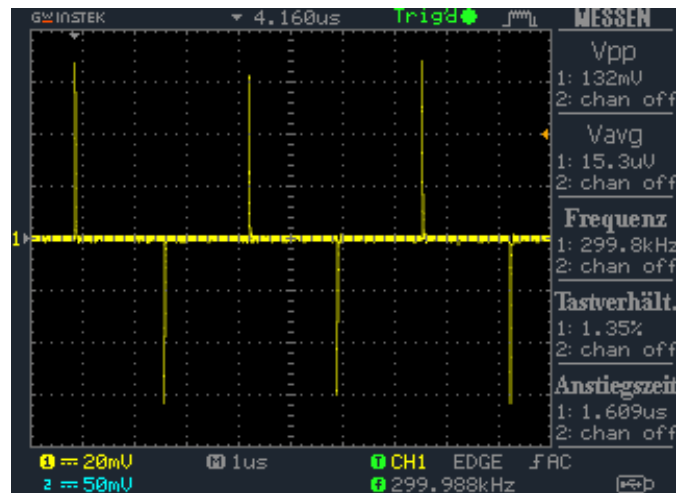


Figure 10: Mehrere Impulse ohne Nachschwingung

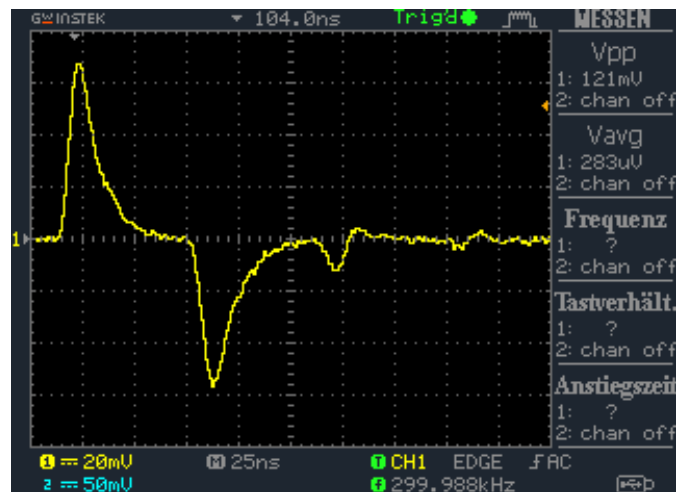


Figure 11: Einzelner Impuls mit gegenphasiger Nachschwingung

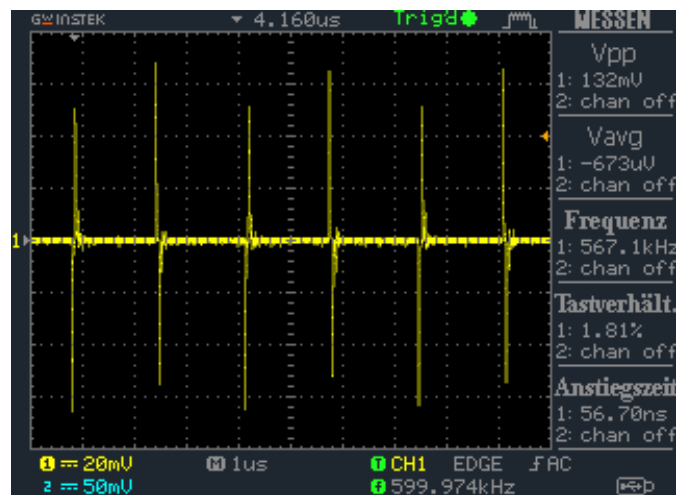


Figure 12: Mehrere Impulse mit gegenphasiger Nachschwingung

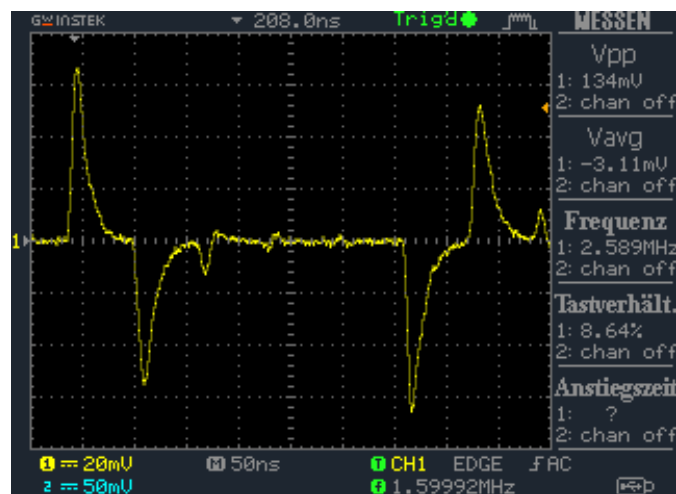


Figure 13: Einzelner Impuls mit gegenphasiger Nachschwingung

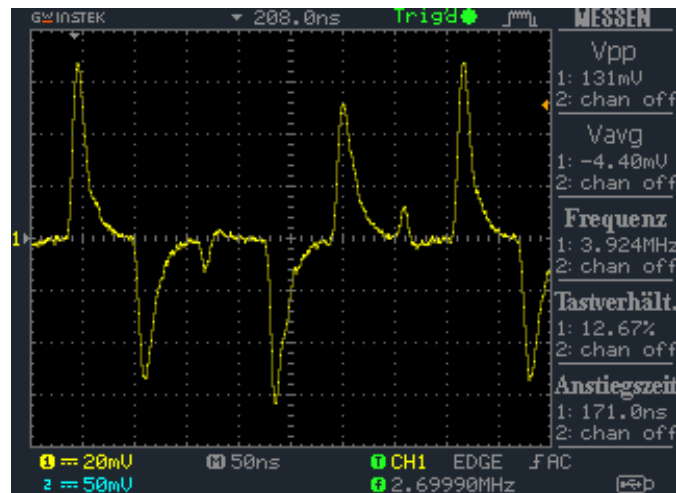


Figure 14: Mehrere Impulse mit gegenphasiger Nachschwingung

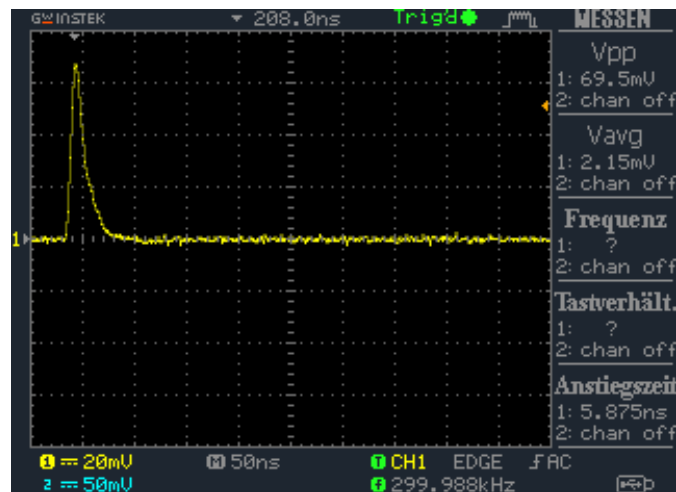


Figure 15: Einzeln Impulse mit abgeschlossenem Kabel

List of Figures

1	Ersatzschaltbild zur Wellenausbreitung; Abbildung 1.3 [1]	2
2	Impulse als Ableitung des Rechtecksignals	5
3	Impulse mit Widerstand	6
4	Schaltung mit offenen Enden	6
5	Schaltung mit offenen Enden	7
6	Schaltung mit offenen Enden	7
7	Einzelner Impuls mit Nachschwingung	8
8	Mehrere Impulse mit Nachschwingung	9
9	Einzelner Impuls ohne Nachschwingung	9
10	Mehrere Impulse ohne Nachschwingung	10
11	Einzelner Impuls mit gegenphasiger Nachschwingung . . .	10
12	Mehrere Impulse mit gegenphasiger Nachschwingung . . .	11
13	Einzelner Impuls mit gegenphasiger Nachschwingung . . .	11
14	Mehrere Impulse mit gegenphasiger Nachschwingung . . .	12
15	Einzelner Impulse mit abgeschlossenem Kabel	12

List of Tables

Source

- [1] Fabian Hügging. *Elektronik-Praktikum Versuchsanleitung*.
Universität Bonn, kurs b edition, 2024.