

## Hinweis

Das vorliegende Protokoll wurde im Rahmen der jeweiligen Lehrveranstaltung an der Universität Bonn erstellt. Sofern im oberen Teil der ersten Seite oder auf der unten angegebenen Webseite nicht anders vermerkt, wurde dieses Protokoll von mir, Marvin Zanke, alleine angefertigt und eingereicht. Bei allem in einer anderen Farbe als dem üblichen Blau handelt es sich in der Regel um Korrekturen von mir oder des Tutors. Für mehr Informationen und meine gesamten Unterlagen, siehe:

<https://www.physics-and-stuff.com/>

**Ich erhebe keinen Anspruch auf Richtigkeit und Vollständigkeit des vorliegenden Protokolls! Dies gilt ebenso für obengenannte Korrekturen.**

Dieses Werk von [Marvin Zanke](#) ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung – Nicht-kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](#).

## 22.08.2016 Versuch 1: Ausbreitung von Signalen auf Leitungen

In diesem Versuch soll die Ausbreitung von Signalen (Pulsen) auf Leitungen besser verstanden werden. Wir betrachten Verzögerung und Reflexion auf den Kabeln und beschäftigen uns dabei insbesondere mit offenen, abgeschlossenen und kurzgeschlossenen Enden.

### Kenntnisse, Grundlagen und Formeln

Impulsformen: Der Generator kann für (bspw.) Spannungen unterschiedliche Formen von periodischen Signalen erzeugen. Beispiele sind: Rechteckimpuls, Sägezahnimpuls, Sinus

Fouriertransformation: (Signalverarbeitungs-konvention)

$$(FF)(y) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) e^{-2\pi i y \cdot x} dx$$

$$f(x) = \int_{\mathbb{R}^n} (FF)(y) e^{2\pi i y \cdot x} dy$$

Mit der Fourier-Transformation kann man kontinuierliche, aperiodische Signale in der Zeit in die einzelnen Frequenzkomponenten zerlegen, welche mit entsprechender Intensität für die jeweilige Frequenz als Überlagerung dann wieder das Signal ergeben. Damit stellt die Fourier-Transformation auch eine Transformation zwischen Orts- und Impulsraum (Impuls  $\Delta$  Frequenz) dar.

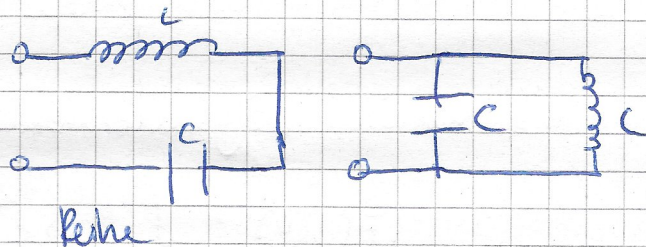
RC-Glieder: Schaltungen aus ohmschen Widerstand und Kondensator.  
 - linear und zeitinvariant!

Tiefpass (Kondensator parallel zu Widerstand am Signalaustritt)

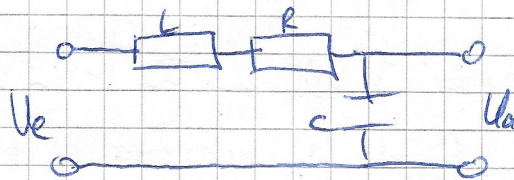
Hochpass (Widerstand parallel am Signalaustritt geschaltet)



LC-Glieder: Auch als Schwingkreis bezeichnet. Schaltung aus Spule und Kondensator, welche zu Resonanz gebracht werden kann. Umwandlung Energie zwischen magnetischem Feld und elektrischem Feld.  
 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  im ungestörten Fall.



Auch: Tiefpass und Hochpass mit Spule:



$|X_C|$  wird kleiner und  $|X_L|$  größer

↳ Ausgangsspannung  $U_a$  fällt oberhalb von  $f_c$  noch schneller ab.

Koaxialkabel: Zweipoliges Kabel mit konzentrischem Aufbau. Innenleiter und Außenleiter (konst. Abstand zueinander). Im Zwischenraum befindet sich ein Dielektrikum. Bestehen Wellenwiderstand und Dämpfung.

Wellenwiderstand: Bestimmt das Verhältnis von reflektierter und transmittierter Amplitude einer Welle in einem Medium an der Grenzfläche zweier Medien.

Ist definiert als Verhältnis von Spannung zu Stromstärke.

Fortpflanzungsmaß:  $\gamma = z' \cdot y' = \sqrt{R' + i\omega L'} \cdot \sqrt{G' + i\omega C'}$

Leitungstheorie:  $\infty$  unendlich  $\sim$  Kurzes Leitungstück - Ersatzschaltbild  $\rightarrow$  System PDG (Leitungsgleichungen)

Leitungseigenschaften: Hin- und Rückleiter; elektrische Eigenschaften über die der ganzen Strecke gleich (homogene Leitung)

$C = \epsilon_r \epsilon_0 l \frac{2\pi}{\ln(a/b)}$ ,  $L = \mu_r \mu_0 l \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi}$  drehbarer Leitwert

Widerstand  $R$ , Induktivität  $L$ , Verlustwert  $G$  und Kapazität  $C$  sind proportional zur Kabellänge Hin- / Rückleitung

$\rightarrow$  Leitungsconstanten:  $R' = \frac{R}{l}$ ,  $L' = \frac{L}{l}$ ,  $G' = \frac{G}{l}$ ,  $C' = \frac{C}{l}$

Spannungsänderung am Eingang einer LC-Kette hat von  $l$  und  $C$  abhängige Laufzeit bis zum Ausgang.

Wellenausbreitung auf homogenen Leitungen:

Dazu benutzen wir ein Ersatzschaltbild für das Kabel, mit vielen L-C-Gliedern und Impedanzen  $Z = i\omega L + R$  bzw. Admittanzen

$Y = i\omega C + G$

$\rightarrow \frac{dU}{dx} = -I \cdot Z'$ ,  $\frac{dI}{dx} = -U \cdot Y'$

$\rightarrow \frac{d^2U}{dx^2} - \gamma^2 U = 0$  mit  $\gamma^2 = Z' \cdot Y'$

Mit Zeitabhängigkeit folgt dann die Lösung als Superposition einer hin- und rücklaufenden ebenen Welle

$U(x,t) = U_h(x,t) + U_r(x,t) = (U_{h0} e^{-\gamma x} + U_{r0} e^{\gamma x}) e^{i\omega t}$   
 $I(x,t) = I_h(x,t) + I_r(x,t) = (I_{h0} e^{-\gamma x} - I_{r0} e^{\gamma x}) e^{i\omega t}$

Anßerdem  $\gamma = \alpha + i\beta \hat{=} \text{Dämpfung}$  und  $\gamma = i\omega\sqrt{L'C'} = i\beta$   
 im verlustfreien Fall  $\checkmark$

Phasengeschwindigkeit und Wellenwiderstand:

für die Phasengeschwindigkeit erhält man  $v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = c_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$

Im verlustfreien Idealfall ist Gruppengeschwindigkeit

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk} = v_{ph}$$

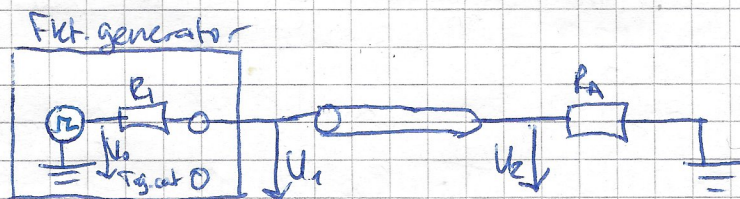
Mit der Definition des Wellenwiderstands  $Z = \frac{U_L(x)}{I_L(x)} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \cdot \begin{cases} \frac{1-i\omega L'}{1-i\frac{G'}{\omega C'}} \\ \frac{1-i\omega L'}{1-i\frac{G'}{\omega C'}} \end{cases}$

erhält man im verlustfreien Fall  $Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$   
 $= \underbrace{\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_r \epsilon_0}}}_{Z_{frei}} = \frac{\ln(\rho_0/R_i)}{2\pi}$

$$\text{und } Z_{frei}^{vac} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$$

Leitungsabschluss und Anpassung:

Um die zurücklaufende Welle zu vermeiden, versucht man die Leitung "anpassen", sodass die Energie vollständig im Abschlusswiderstand  $R_A$  verbraucht wird. Dazu muss der Wellenwiderstand  $Z$  des Kabels gleich dem Abschlusswiderstand  $R_A$  sein, sodass das Kabelende wie eine Fortsetzung des gleichen Kabels (aus Sicht des Kabels) aussieht. Die einzigen Verluste sind die auf der Leitung.



$$R_A = \frac{U_L(l) + U_R(l)}{I_L(l) + I_R(l)} = Z \cdot \frac{U_{inc} + U_{refl}}{U_{inc} - U_{refl}} = Z \cdot \frac{1+r}{1-r}, \quad r = \frac{U_{refl}}{U_{inc}}$$

$$\Gamma = \frac{1 - \frac{Z}{R_A}}{1 + \frac{Z}{R_A}} \quad \text{Reflexionsfaktor}$$

$$\xi = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \text{Stehwellenverhältnis}$$

$$m = \frac{1}{S} \quad \text{Anpassungsfaktor}$$

→ 3 Fälle: angepasster Abschluss, offene Leitung, Kurzschluss

$$\Gamma: R_A = Z$$

$$Z: R_A = \infty$$

$$\xi: R_A = 0$$

$$\Gamma: U_1 = U_{\text{ind}} = \frac{U_0}{2}$$

$$U_2 = U_{\text{inc}} \quad ; \quad I_2 = I_{\text{inc}} = \frac{U_2}{Z}$$

$$\Gamma = 0$$

$$Z: I_2 = 0 \quad \rightarrow \quad I_{\text{refl}} = -I_{\text{inc}} \quad \rightarrow \quad U_{\text{refl}} = U_{\text{inc}} = \frac{U_2}{2}$$

$$\Gamma = +1$$

$$S: U_2 = 0 \quad \rightarrow \quad U_{\text{refl}} = -U_{\text{inc}} \quad \rightarrow \quad I_2 = I_{\text{inc}} + I_{\text{refl}} = 2I_{\text{inc}}$$

$$\Gamma = -1$$

Aufgabe A: Große Verzögerungszeit  $\hat{=}$  kleine Phasengeschwindigkeit

Mit  $v_{\text{ph}} = c_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$  kann deshalb  $\epsilon_r$  groß gewählt werden. Da wir bloß die Leitungsconstanten (Längen unabhängig) betrachten, kann das Kabel auch verlängert werden.

Aufgabe B: Um die Permittivität zu erhöhen kann man ein

Dielektrikum in das Kabel einfügen. Da  $Z \propto \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}}$

folgt für diesen Fall eine kleinere Impedanz.

Für eine größere Permeabilität folgt eine größere Impedanz.

Lässt man  $\mu_r$  und  $\epsilon_r$  um den gleichen Faktor variieren, so bleibt die Impedanz bei variabler Phasengeschwindigkeit

konstant.

Aufgabe C: Einigungswiderstand ist vom Signalgenerator spürbar beim Triggern ins Kabel, also  $R_{\text{in}} = \frac{U_{\text{in}}(\omega)}{I_{\text{in}}(\omega)}$ .

Da  $R_A = Z$  folgt keine Reflexion und für den

Wellenwiderstand  $Z$  gilt die gleiche Beziehung:  $Z = \frac{U_{in}(s)}{I_{in}(s)}$

Mit  $Z' = \frac{Z}{l} \Leftrightarrow Z = Z'l$  folgt dann also

$\rightarrow R_{in}(l) = Z = Z'l = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}$  ← Müssen hier

$R_A = Z \rightarrow$  no reflection  $\rightarrow R_{in} = \frac{U_{in}(s,t)}{I_{in}(s,t)} = Z \rightarrow$  no dependence on  $l$  die  $R', L', G', C'$  sein?

Aufgabe 2:

see formulas 1.7 & 1.8 in script

Mit der Definition des Wellenwiderstandes  $Z = \frac{U_{in}(x)}{I_{in}(x)}$

und dem Tipp im Praktikumsheft folgt vorerst:

$$Z_{in} = \frac{U_{in} e^{-rx} + U_{ro} e^{rx}}{U_{in} e^{-rx} - U_{ro} e^{rx}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{R' + i\omega L'}{G' + i\omega C'}}}_{Z} = \frac{U_{in} + U_{ro}}{U_{in} - U_{ro}} \cdot Z$$

Mit  $U_{ro} = U_{in} e^{-i\Delta\varphi}$

$\Delta\varphi = k \cdot \Delta x = k \cdot 2L$

folgt zuerst:

$U_{ro} = U_{in} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} L}$

und damit dann

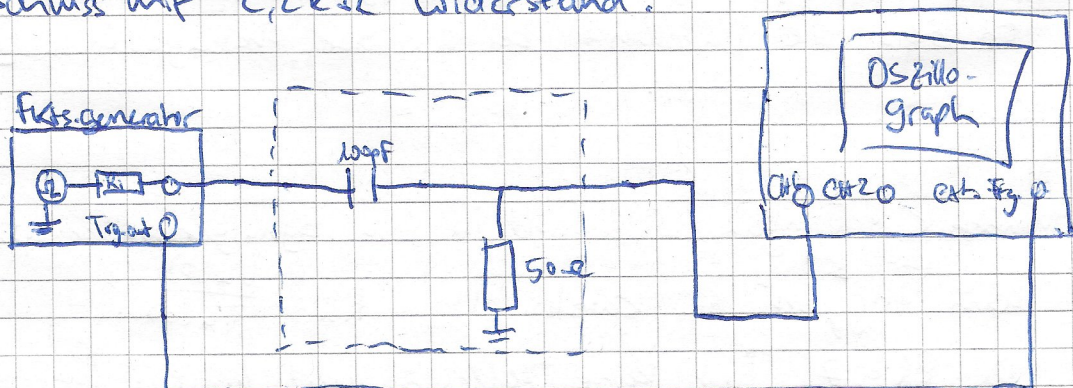
↑ Wegdifferenz  
am Punkt 0.

$$Z_{in} = Z \cdot \frac{U_{in} \frac{1 + e^{-\frac{4\pi i L}{\lambda}}}{1 - e^{-\frac{4\pi i L}{\lambda}}}}{U_{in} \frac{e^{\frac{2\pi i L}{\lambda}} + e^{-\frac{2\pi i L}{\lambda}}}{e^{\frac{2\pi i L}{\lambda}} - e^{-\frac{2\pi i L}{\lambda}}}} = Z \frac{1 + e^{-\frac{4\pi i L}{\lambda}}}{1 - e^{-\frac{4\pi i L}{\lambda}}} \cdot \frac{e^{\frac{2\pi i L}{\lambda}} - e^{-\frac{2\pi i L}{\lambda}}}{e^{\frac{2\pi i L}{\lambda}} + e^{-\frac{2\pi i L}{\lambda}}}$$

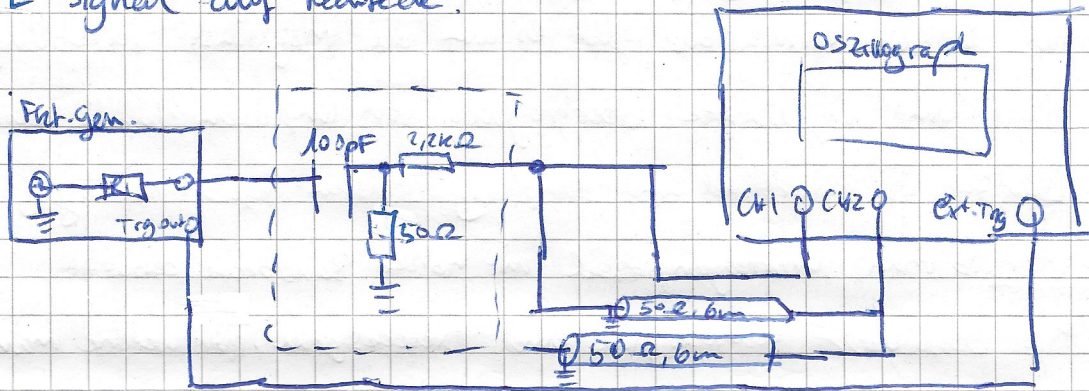
$$= Z \frac{2 \cos(2\pi \frac{L}{\lambda})}{2i \sin(2\pi \frac{L}{\lambda})} = -iZ \cot(2\pi \frac{L}{\lambda}) \checkmark$$

Versuchsaufbau und Durchführung

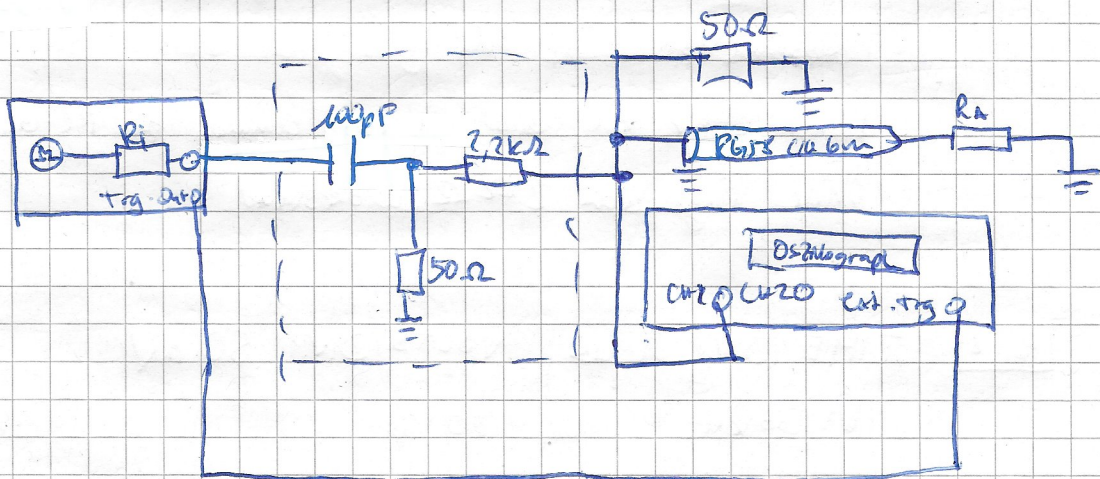
Im ersten Versuchsteil differenziert man das Rechtecksignal mit Hilfe eines Hochpassgliedes und zeichnet das Oszillogramm (extern getriggertes Oszillograph) einmal mit und einmal ohne Abschluss mit  $2,2k\Omega$  Widerstand.



Im zweiten Versuchsteil geht es um Impulse auf einem Kabel, welches an beiden Enden offen ist. Kurze Impulse werden über einen Differenzierer über großem Widerstand in das Kabel geleitet. Man überwacht die Spannung mit beiden Kanälen direkt am Eingang und in der Mitte des Kabels. Man triggert mit einem TTL-Signal auf Rechtecke.



Im dritten Versuchsteil arbeitet man zuerst mit offenem Ende des Verzögerungskabels und zeichnet das Oszillogramm für den Fall mit und ohne 50 Ω Anpassungswiderstand. Man variiert die Zeitlinkung des Oszillographen und schließt das Verzögerungskabel in einem weiteren Teil kurz. Außerdem betrachtet man das Oszillogrammbild bei verschiedenen Frequenzen und bestimmt daraus die Verzögerungszeit des Kabels.



Im vierten Versuchsteil geht es um Klippkabel um Impulse auf eine bestimmte Länge zu kürzen. Man betrachtet das Verzögerungskabel mit offenem Ende und kurzgeschlossenem



Ende. Dabei variiert man dann die Frequenz und erklärt die Beobachtungen.

Außerdem betrachtet man in dem Verstärker die Dämpfung der Amplitude eines Spannungsimpulses und ermittelt eine spezifische Dämpfung.

Im fünften Verstärker geht es um die möglichst verzerrungsfreie und ungedämpfte Übertragung von Impulsen durch Kabel.

Laufzeit, Wellenwiderstand und Dämpfung müssen frequenzunabhängig sein, weshalb man Übertragungskabel mit hoher Bandbreite benutzt.

Man betrachtet Rechtecksignale und Dreiecksignale, für welche man verschiedene Frequenzen variiert, und andere Signalformen, sowie deren Unterschiede.

$\bar{Z}_K \parallel \bar{Z}_R$

Messung: HAMEG INSTRUMENTS 35MHz ANALOG OSCILLOSCOPE HM303-6  
PROGRAMMABLE 15MHz FUNCTION GENERATOR HM813A-2

Teil 1:  $V = 200\text{kHz}$ , TIME/DIV:  $1\mu\text{s}$   
VOLTS/DIV:  $0,1\text{V}$

$$U_{pp} = 1\text{V}_{pp}$$

Einmal für RC-Glied mit und einmal für RC-Glied ohne eingebauten  $22\text{k}\Omega$  Widerstand.

Teil 2: TIME/DIV:  $1\mu\text{s}$ , VOLTS/DIV:  $50\text{mV}$   
 $V = 200\text{kHz}$ ,  $U_{pp} = 20\text{V}_{pp}$

Teil 3 :  $V = 200 \text{ kHz}$  ,  $U_{pp} = 20 \text{ V}_{pp}$

a) VOLTS/DIV:  $50 \text{ mV}$

TIME/DIV:  $1 \mu\text{s}$

Mit  $50 \Omega$ -Anpassungswiderstand kleinere Amplitude (Erst ohne)

b)  $\times$ -Magnitude  $\times 10$  (erst mit)

c) erst mit Anpassungswiderstand: Zweiter Peak in entgegengesetzter Richtung

ohne Anpassungswiderstand Verzerrung und Schwärzung um Null

d) MIT  
 $V_1 = 200 \text{ kHz}$   
 $V_2 = 600 \text{ kHz}$   
 $V_3 = 1000 \text{ kHz}$

OHNE  
 $V_1 = 100 \text{ kHz}$   
 $V_2 = 300 \text{ kHz}$   
 $V_3 = 600 \text{ kHz}$

Impulse in einem Signal haben vom Abstand unverändert?

Nur der Abstand zwischen verschiedenen Impulsen

verändert sich. (Erst mit; dann ohne)

Bei Abschluss mit dem Wellenwiderstand <sup>des Kabels</sup> erwartet man keine Reflexion mehr. Das Signal sollte ungestört auf dem Oszilloskop angezeigt werden.

$V = 800 \text{ kHz}$

Teil 4 : a)  $V = 80 \text{ kHz}$  , TIME/DIV:  $2 \mu\text{s}$  , VOLTS/DIV:  $5 \text{ V}$

$U_{pp} = 20 \text{ V}_{pp}$

b) kurzgeschlossen, leicht verschoben und Abstände enger

c) Impulsabstände zwischen verschiedenen Impulsen werden größer, innerhalb eines Impulses bleibt gleich

d) Abhängig von Verzögerungszeit

e) Vergleich 0,7m Kabel mit 2m Kabel.

### Teil 5

a)

b) Channel 2 (HH-Kabel) verzögert. Geht in einen Sinus über.

Ab 500kHz merkt man Unterschiede

e)

d) Triangle; Sinus; Square

e) Channel 1 (RG58 (U-Kabel) hat größere Bandbreite weil es eine kleinere Verzögerungszeit hat.

Teil 3

## Auswertung

Teil 1, Mit Frequenz  $f = 200 \text{ kHz}$ , Amplitude  $U_{pp} = 1 \text{ V}_{pp}$ ,  
x-Skala  $1 \mu\text{s}/\text{Div}$  und y-Skala  $0,1 \text{ V}/\text{Div}$  erhält man folgendes  
Oszillogramm für den extern getriggerten Oszillator:

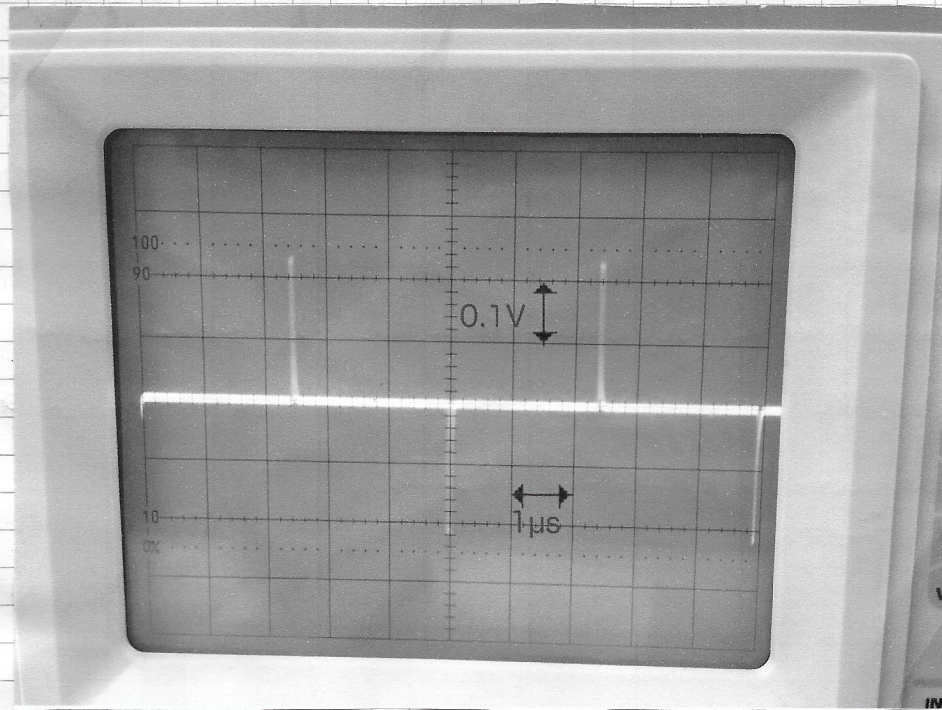
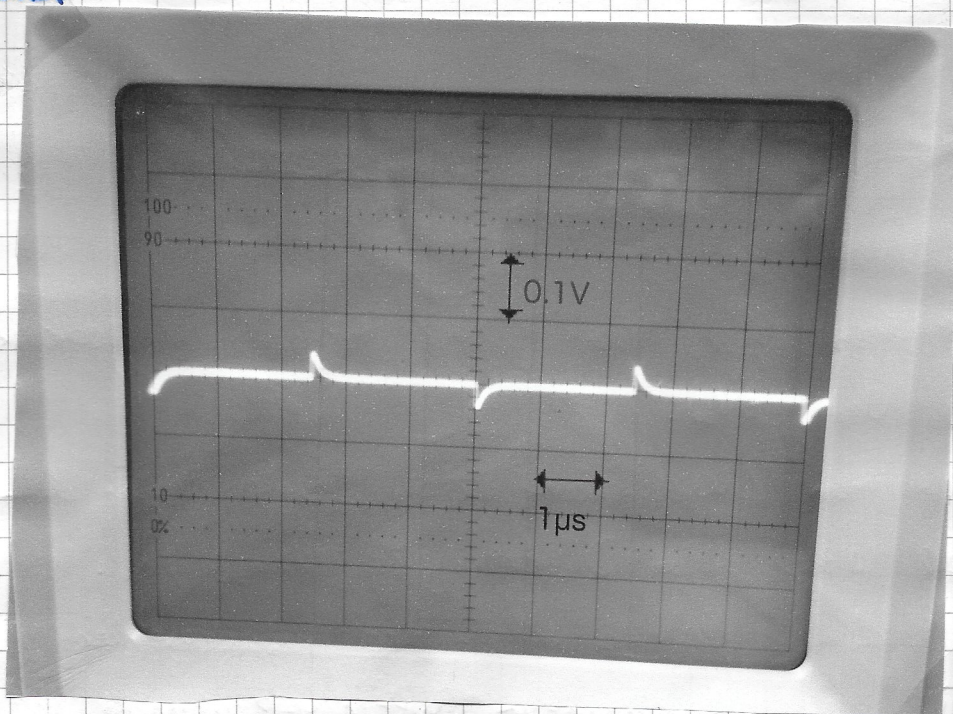


Figure number  
and name. !!!  
ex. figure 1.1 ~  
and make proper  
citation in the  
text !!!

Durch den eingebauten Widerstand von  $2,2 \text{ k}\Omega$  im anderen  
RC-Glied werden die Impulse deutlich kleiner; dafür aber  
breiter

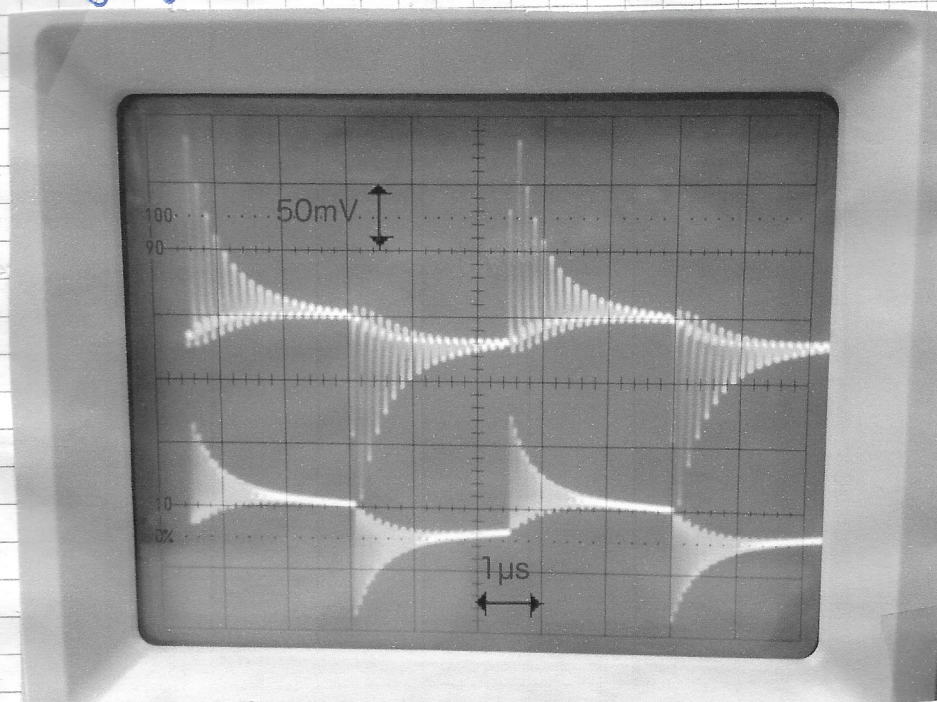


Das Signal wird durch den Widerstand deutlich geschwächt /  
gedämpft. Dafür werden die Pulse aber auch breiter, was man

dadurch erklären kann, dass die Auf- und Entladung des Kondensators durch den Widerstand beeinflusst wird, welche dadurch länger braucht um den Kondensator aufzuladen oder zu entladen.

## Teil 2

wir betrachten Pulse auf einem Kabel, was auf beiden Seiten offen ist. Die Impulse laufen hin und her. Der Oszilloskop ist extern getriggert. Man beobachtet folgendes:



bei x-Skala:  $\frac{1\mu s}{5\text{ Div}}$ , y-Skala:  $\frac{50\text{mV}}{1\text{ Div}}$ , Frequenz  $f = 100\text{kHz}$   
und  $U_{pp} = 20\text{V}_{pp}$ .

Hier sieht man 2 Wellenpakete, welche beide wegen dem  $2,2\text{k}\Omega$ -Widerstand im Differenzglied gedämpft sind.

Ein Paket ist oberhalb und ein Paket unterhalb der Nulllinie (mit entsprechendem Shift in y-Richtung).

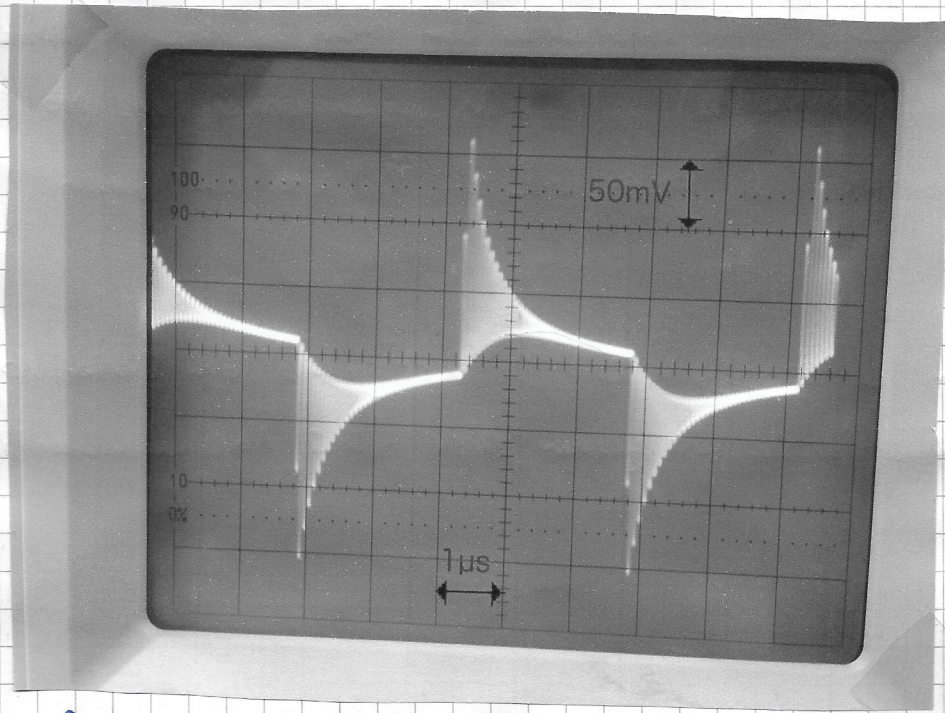
Das Signal im Channel 2 ist schwächer, weil hier an einem offenen Ende reflektiert wird

Differenzierer liegt.

### Teil 3

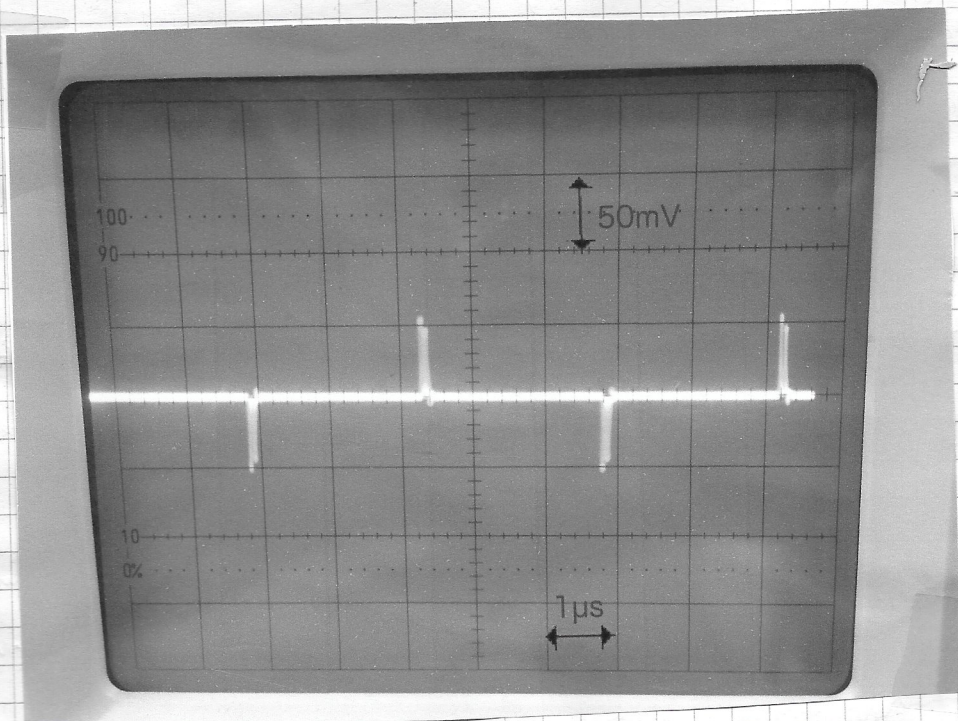
a) In diesem Versuchsteil sollen verschiedene Leitungsergebnisse untersucht werden. Das Ende des Verzögerungskabels bleibt dabei verast offen. Wir messen jeweils einmal mit  $50\Omega$  Anpasswiderstand und einmal ohne.

Die Frequenz haben wir auf  $f = 200\text{kHz}$  eingestellt, die Amplitude auf  $U_{pp} = 20\text{Vpp}$ , x-Skala auf  $1\mu\text{s/DIV}$  und y-Skala  $5\text{mV/DIV}$ .  
Erst ohne Anpasswiderstand:



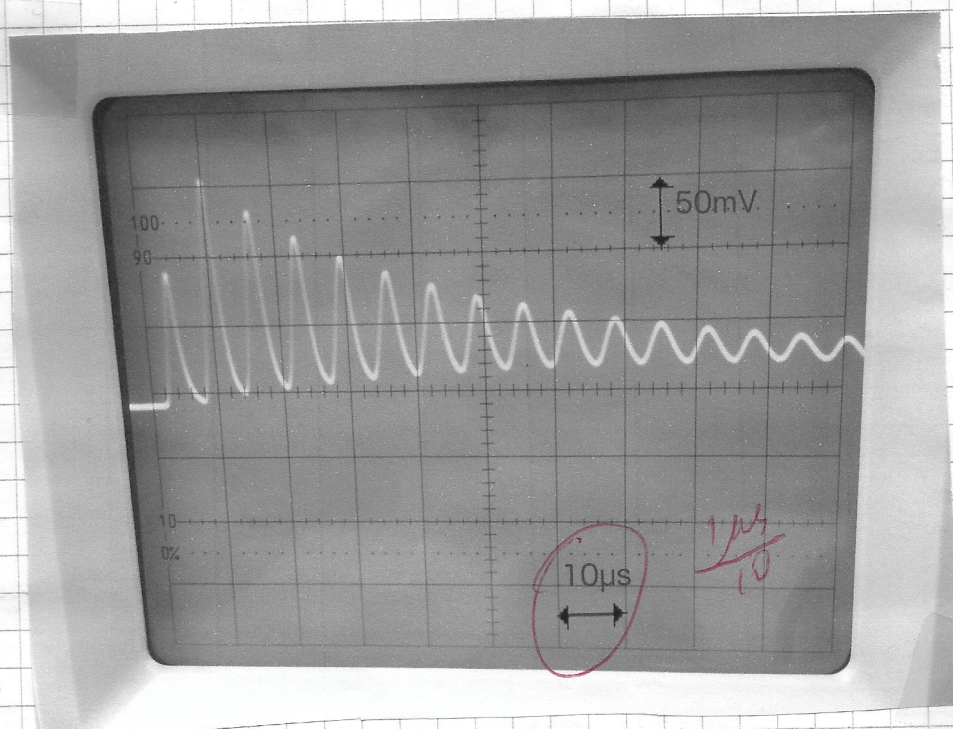
Der Puls kann hier ohne Verzögerung am Oszillator registriert werden. Dafür wird er aber auch am offenen Ende des Kabels reflektiert und am Anfang des Kabels dann wieder (weil hier der  $50\Omega$  Anpasswiderstand nicht).  
So klingt der Puls dann allmählich ab (das sind die einzelnen Peaks innerhalb der Einhüllenden).

Für den Fall mit Anpasswiderstand folgt folgendes Oszillogramm.



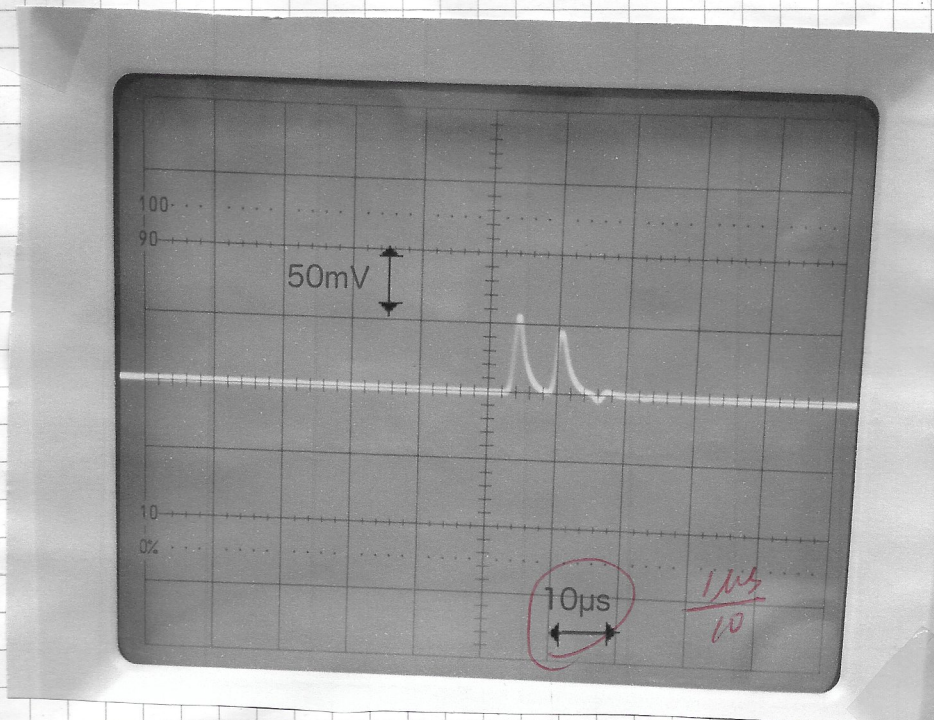
Das Signal wird hier nicht erneut am Anfang des Kabels reflektiert (angepasster Abschluss), sodass man genau zwei Peaks pro Puls registriert (der zweite durch die Reflexion am offenen Ende).

b) Im zweiten Teil vergrößern wir die x-Magnifikation um Faktor 10. Man erhält für das Oszellogramm ohne 50Ω Anpasswiderstand:



Man erkennt das oben beschriebene hier noch einmal um einen Faktor 10 deutlicher: Das Signal wird hin und her geschickt im Kabel, es kommen immer weiter geschwächte Impulse im Oszillograph an.

Im Fall mit dem  $50\ \Omega$  Anpasswiderstand folgt das Oszillogramm:



Hier sind wieder deutlich die zwei Peaks zu erkennen, weil nur noch eine Reflexion stattfindet.

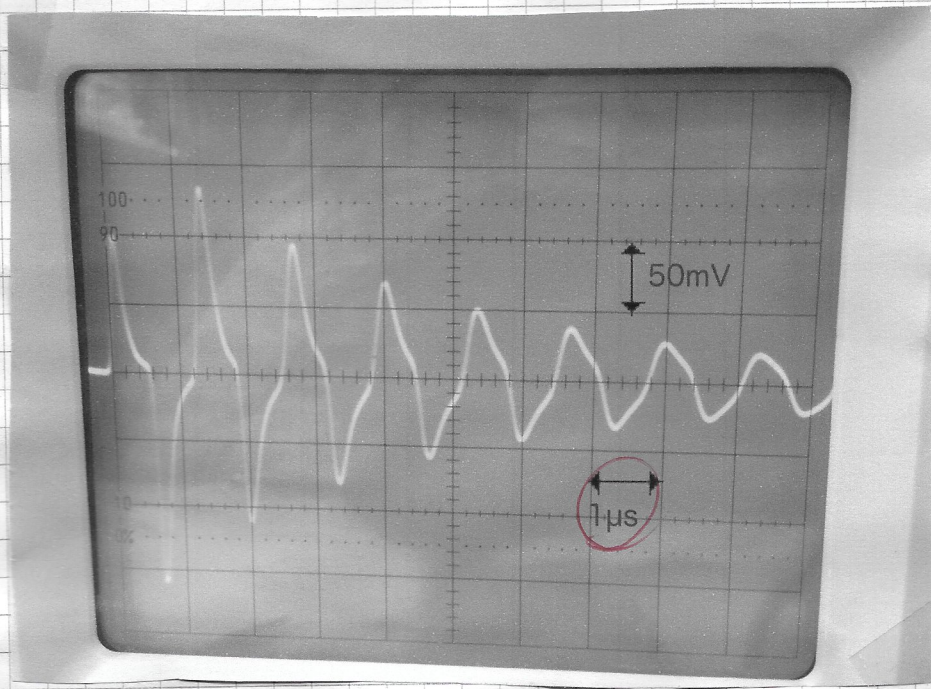
Die Peaks haben auf Grund des größeren Widerstands einen gedämpften Spitzenwert in der Spannung.

c) Im dritten Teil schließen wir das Verzögerungskabel mit einem Kurzschlussstecker kurz.

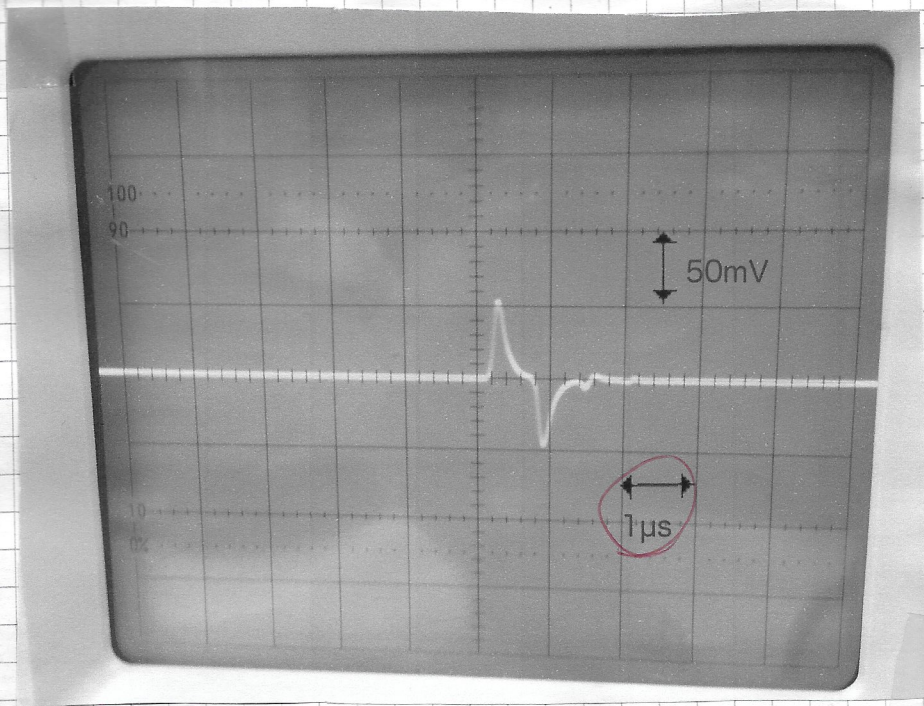
Für den Fall ohne Widerstand erhält man wieder eine gedämpfte Reihe von Reflexionen, während man für den Fall mit Anpasswiderstand nur 2 Peaks erhält. Der große Unterschied liegt hierbei jetzt darin, dass das Kabel kurzgeschlossen ist, und die Reflexion deshalb die Amplitude umkehrt und nicht wie in b) eine gleich große Amplitude zurückwirft.



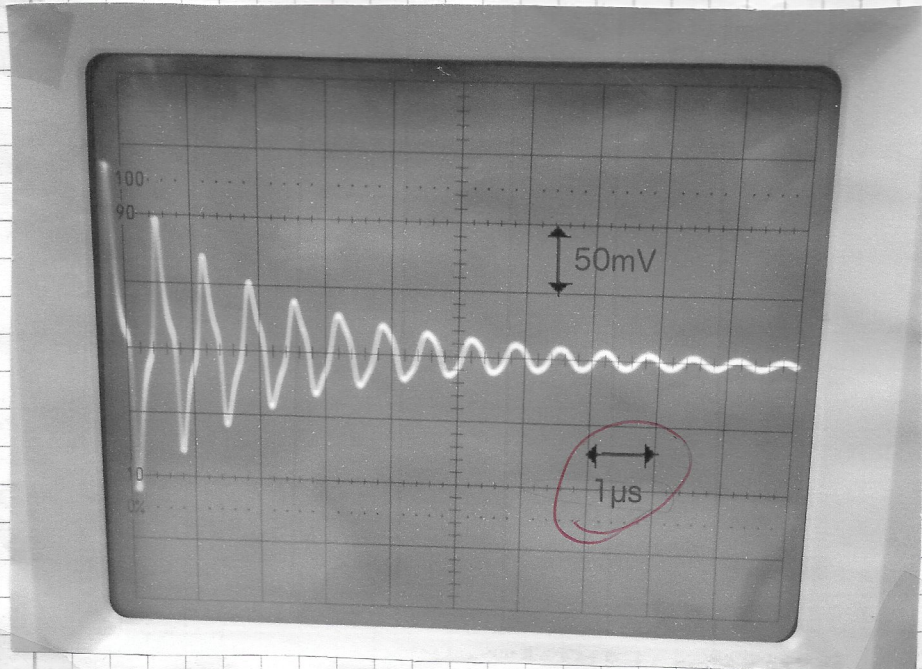
Für den Fall ohne Anpasswiderstand folgt das Oszillogramm.



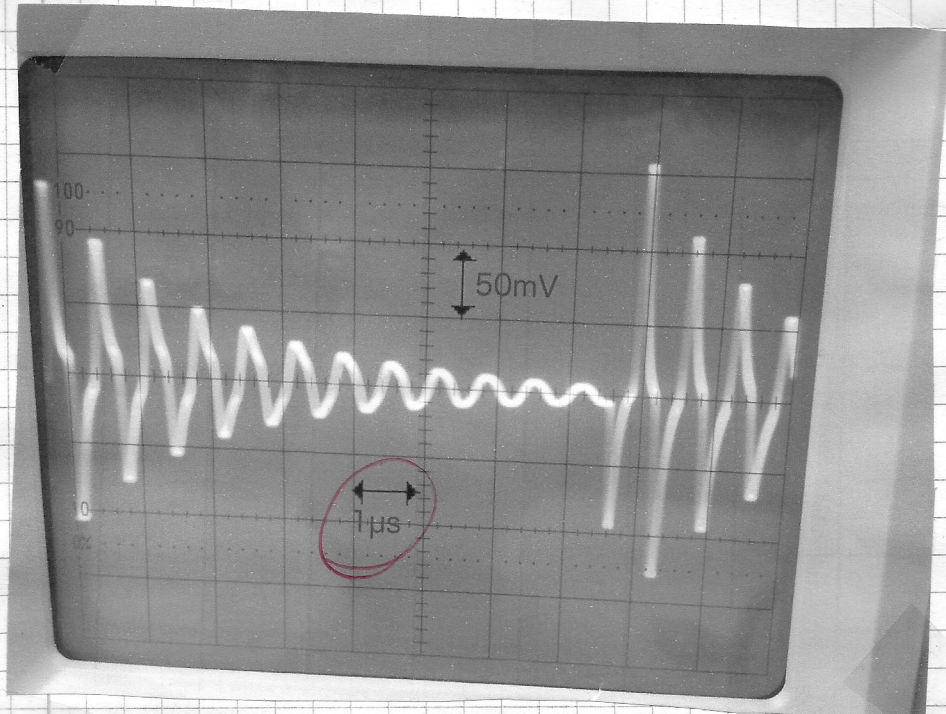
Und für den Fall mit Anpasswiderstand erhalten wir



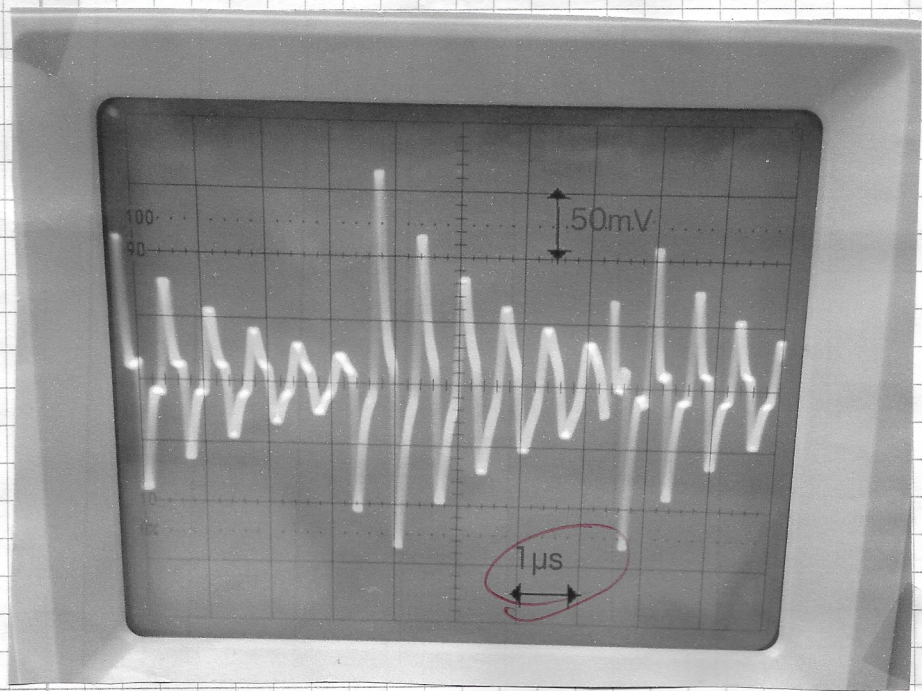
- d) Hier wird die Frequenz variiert und geschaut, welche Abstände sich bei den Impulsen verändern.  
Zuerst die Bilder des Oszillographen ohne Anpasswiderstand bei einer Zeitablenkung von  $0,2\mu\text{s/cm}$ .



$V = 100\text{kHz}$

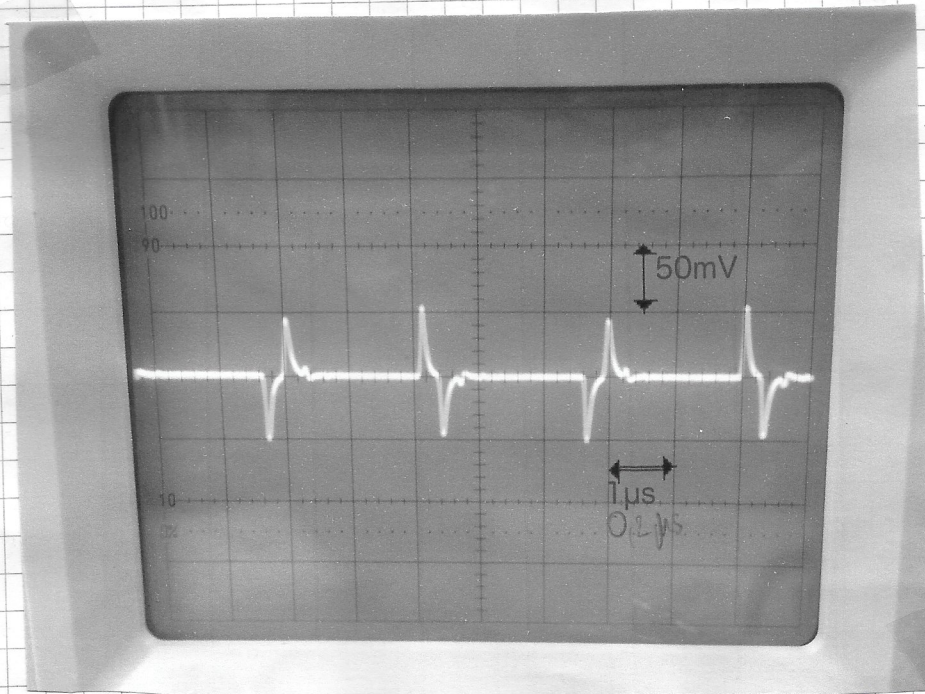
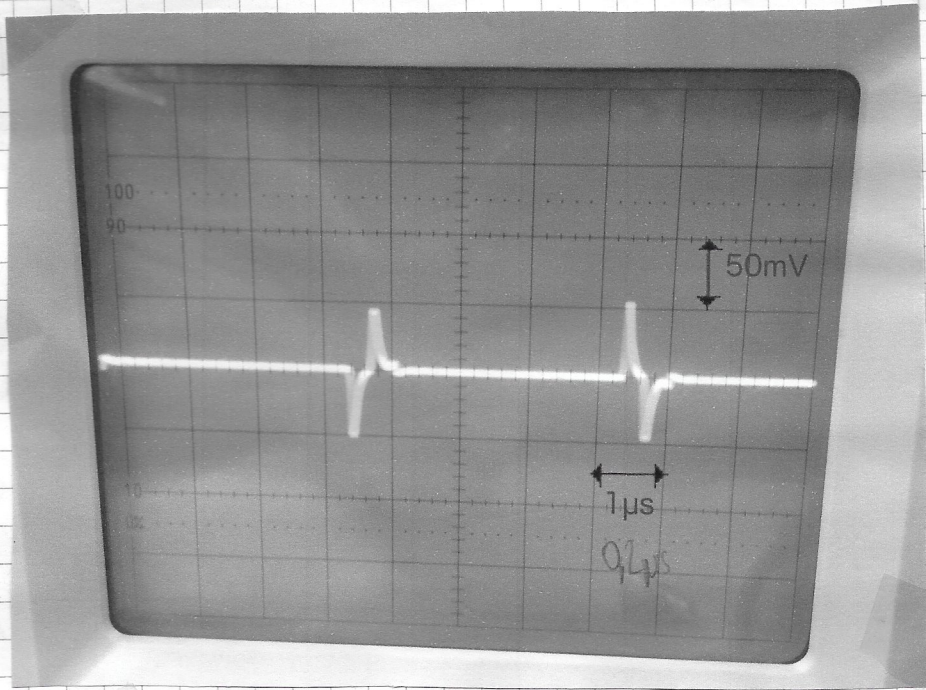
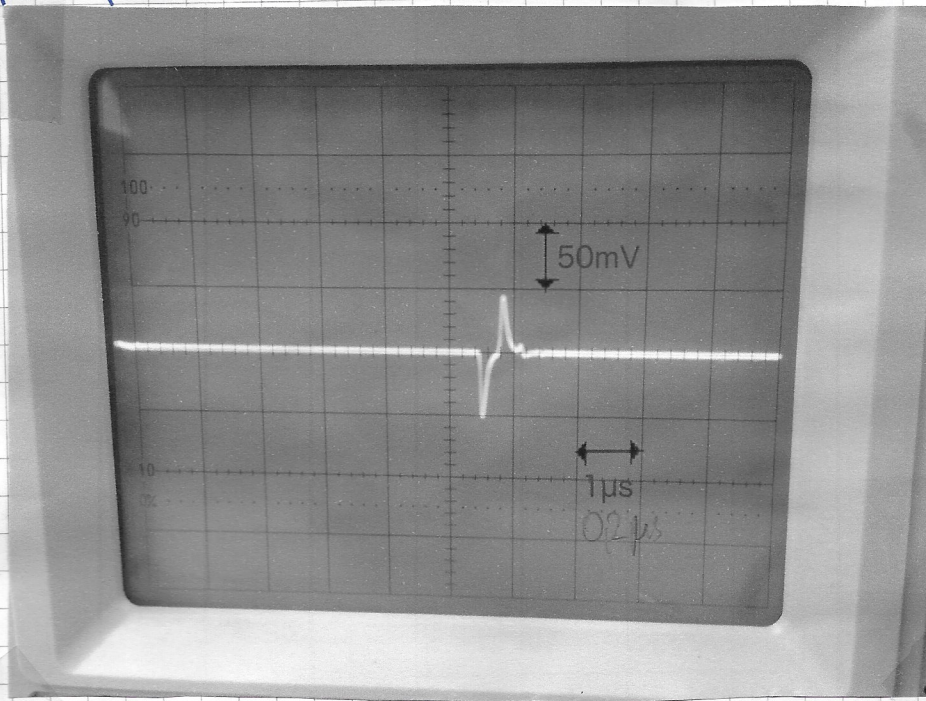


$V = 300\text{kHz}$



$V = 600\text{kHz}$

Mit Anpasswiderstand 50-Ω



Die Abstände von einem Impuls zum nächsten ändern sich offensichtlich, während die Abstände innerhalb eines Impulses gleich bleiben (Sawtooth in x- als auch y-Richtung).

Das kommt daher, dass die Abstände innerhalb der Pulse (Peak-Peaks) durch die Verzögerungszeit im Kabel bestimmt werden, während die Abstände zweier Pulse von der Frequenz bestimmt wird. Da wir hier nur diese variieren, ergibt sich dieses Resultat.

Man bestimmen wir noch die Verzögerungszeit des Kabels mit dem Oszillogramm.

*measured from which figure?  
should magnify the x-axis by 10 to have more precise result*

Offensichtlich kommt das reflektierte Signal etwas später an, als das ursprüngliche. Adesso ergibt:  $\Delta t = \frac{7}{20} (0,2 \mu s) \pm \frac{7}{200} (0,2 \mu s)$

$$= (0,07 \pm 0,007) \mu s$$

$$\frac{0,2 \mu s}{200}$$

*Sollte das nicht in sein?*

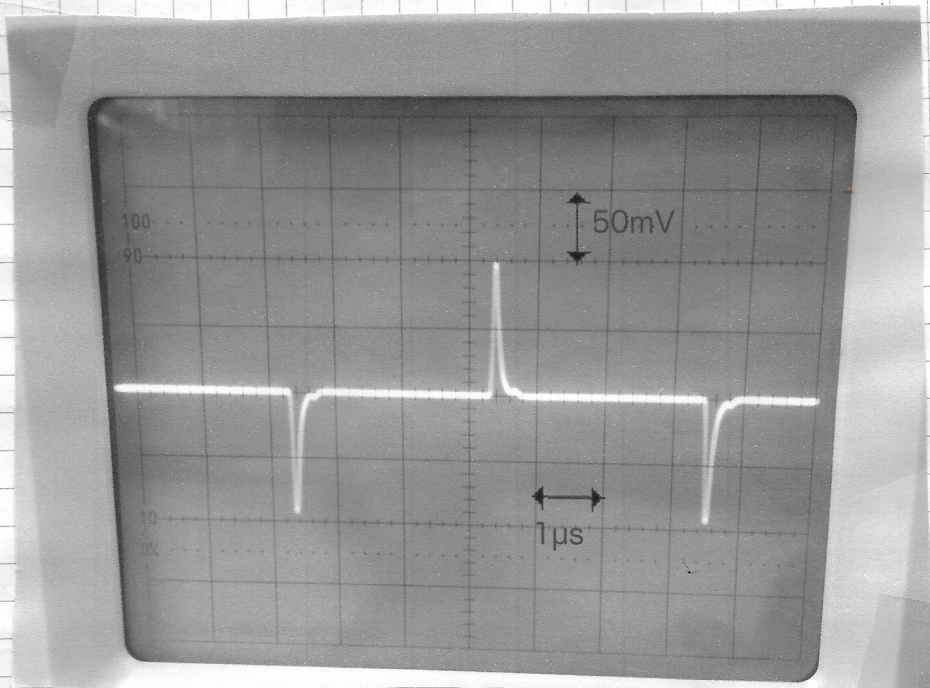
Dies ist also die Zeit, die es in etwa braucht, zwei mal das 6m Kabel zu durchlaufen, also knapp 12m.

$$\Rightarrow \frac{\Delta t}{12m} = \frac{(70 \pm 7) ns}{12m} = (5,83 \pm 0,583) \frac{ns}{m}$$

Was in guter Übereinstimmung zu dem Literaturwert von  $5 \frac{ns}{m}$  liegt.

Bei Abschluss mit seinem Wellenwiderstand erwarten wir keine Reflexion mehr. Dadurch sollte das Signal ungestört beim Oszilloskop ankommen und angezeigt werden.

Man sieht auf dem Oszillogramm auch deutlich werden einen Peak, der durch den Differenzierer gefiltert wurde.

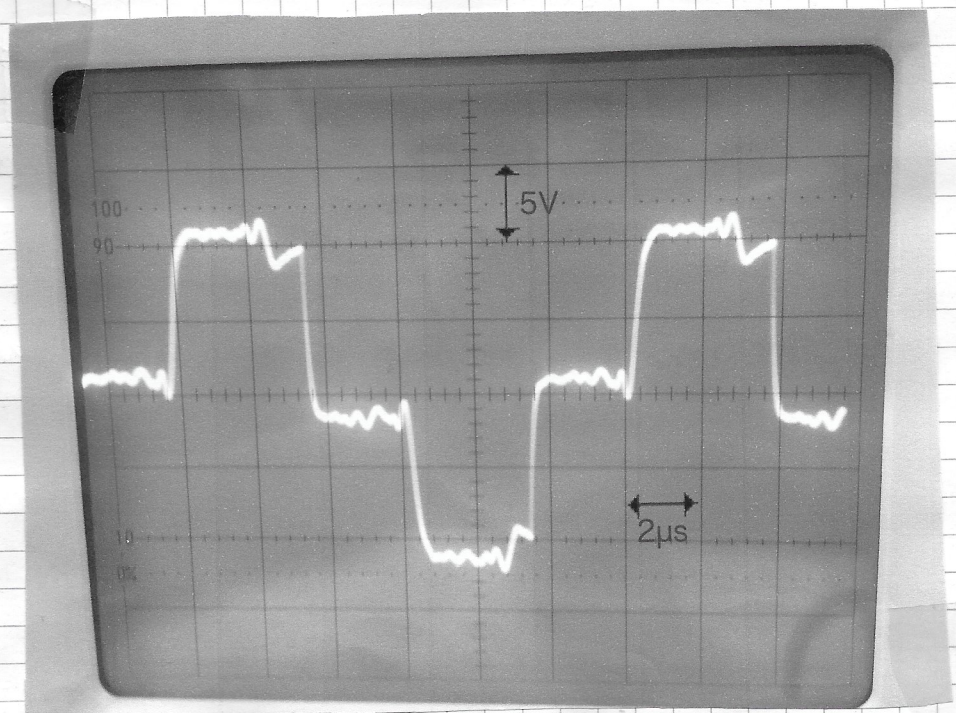


### Teil 4

In dem nertem Teil will man mit einem sogenannten "klippkabel" Impulse auf eine bestimmte Länge kürzen. Hierbei nutzt man die Reflexion an einem kurzgeschlossenen Verzögerungskabel.

- a) Bei offenem Ende des Verzögerungskabels wären unsere Messwerte: Frequenz  $f = 80\text{kHz}$ , Amplitude  $U_{pp} = 20\text{V}_{pp}$ ,  
 $x$ -Skala  $\frac{2\mu\text{s}}{\text{DIV}}$ ,  $y$ -Skala  $\frac{5\text{V}}{\text{DIV}}$

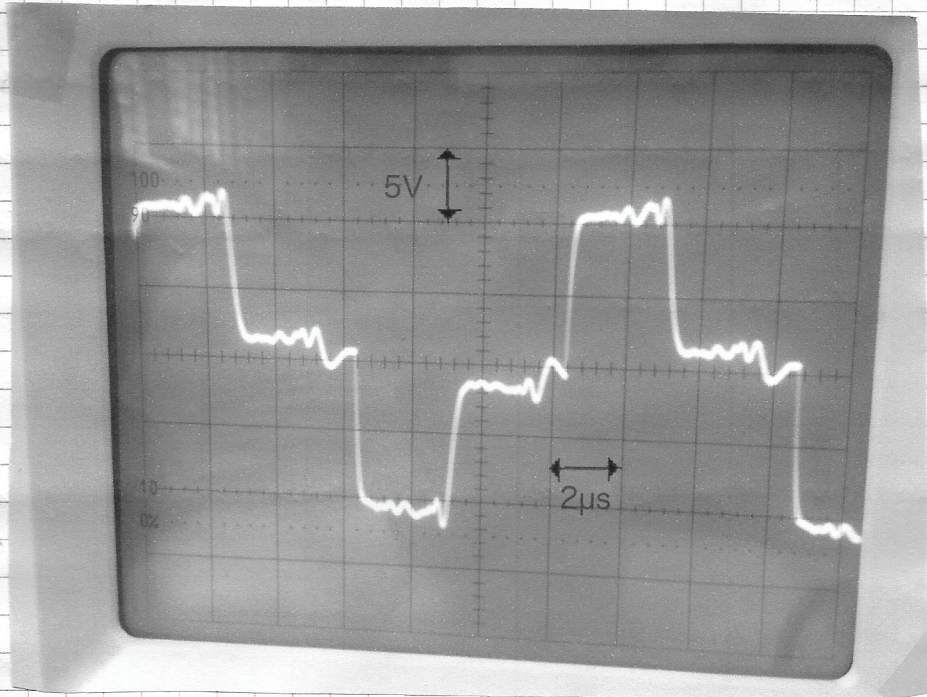
Das Oszillogramm für diesen Fall ( $R_L = \infty$ ) sieht folgendermaßen aus:



Jeder Puls besteht hier aus dem Puls des Funktionsgenerators, überlagert mit dem am offenen Ende reflektierten Puls (gleiche Amplitude und Phase;  $r=+1$ ).

Die reflektierten Pulse scheinen dabei etwas schwächer in ihrer Amplitude zu sein (gut am Ende der jeweiligen Pulse zu erkennen), was daran liegt, dass das Verzögerungskabel die Pulse auf dem Weg etwas dämpft.

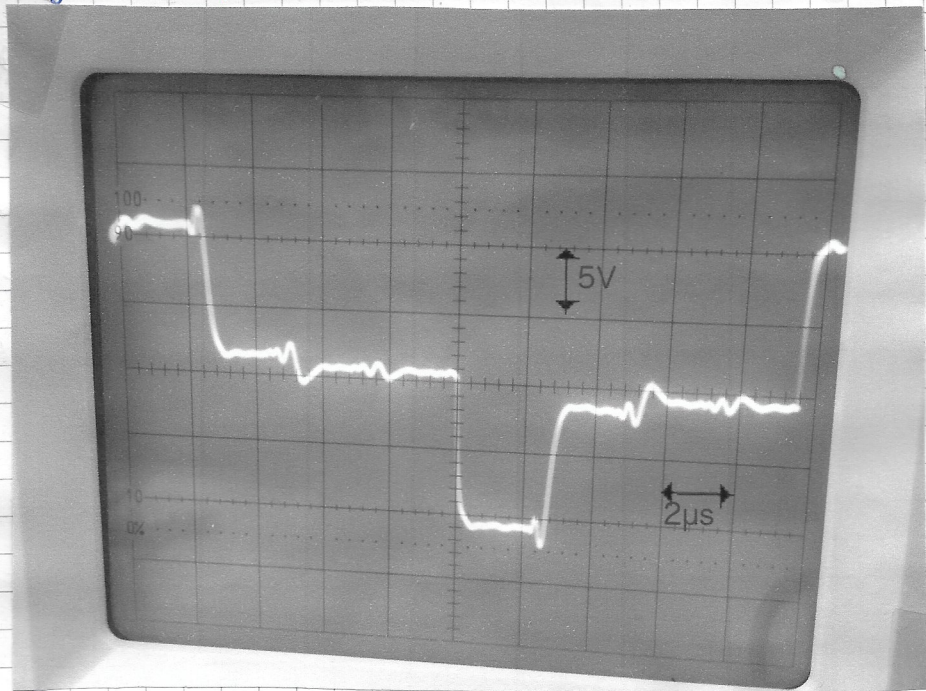
- b) Das Verzögerungskabel wird jetzt kurzgeschlossen. Es ergibt sich folgendes Oszillogramm:



Mit  $R_A = 0$  ergibt sich nun ein Phasensprung bei Reflexion am kurzgeschlossenen Ende. Im Vergleich zum offenen Fall werden die Pulse also nicht vergrößert, sondern gekürzt, weil der reflektierte Impuls mit dem ursprünglichen destruktiv überlagert und sich so auslöscht.

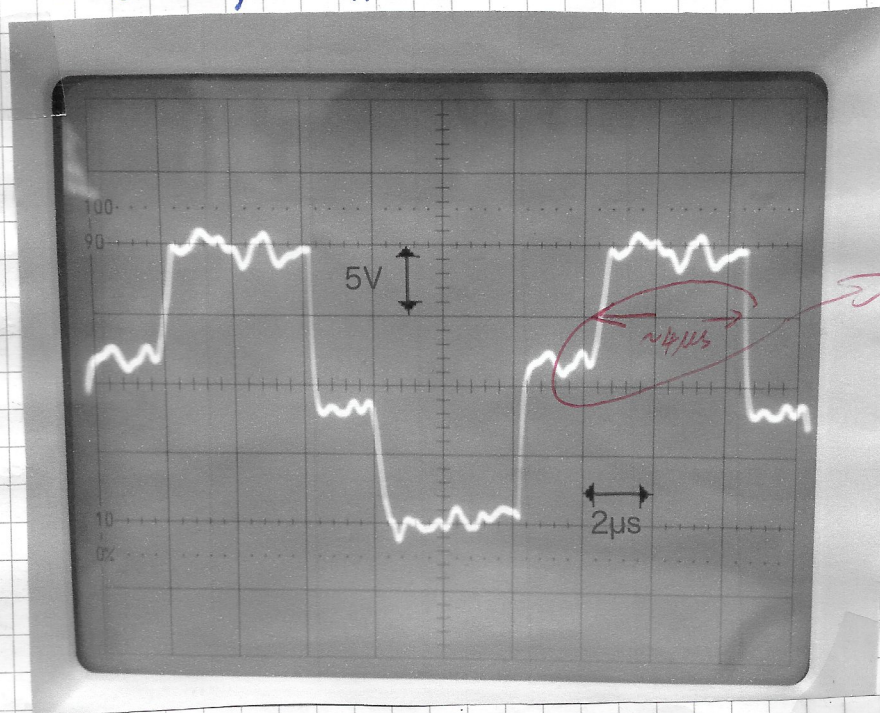
- c) Hier wird nun die Frequenz etwas variiert. Dabei ändert sich der Abstand der einzelnen Pulse, während die Breite und Länge derselben nach wie vor gleich bleibt. Das Oszillogramm

sicht folgendermaßen aus:



Der Grund hierfür ist der Gleiche wie in den vorigen Aufgabenteilen (3d). Die Frequenz beeinflusst bloß die Abstände zwischen den Peaks, während Breite bzw. Länge von der Verzögerungszeit abhängen (konstant bei uns).

d) Bei dem zum langen Klippkabel erhält man das Oszillogramm:



I would expect a pulse width  $\times$   
i.e.  $\approx 8.5 \mu s$

Dort sieht man jetzt deutlich, dass die Länge der Pulse variiert. Diese hängt also von der Länge des Verzögerungskabels

(und damit auch von der Verzögerungszeit) ab.

~~e)~~ Hier zu betrachten man im Bild aus Teil b) den Puls und den "ausgetönten" Puls, welcher immer noch eine verbleibende Amplitude hat. Für den ursprünglichen Puls erhält man als Maximalwert:  $U_{max} = (11 \pm 0,5) V$ , während der überlagerte Puls  $U_g = (2 \pm 0,5) V$  beträgt.

Schaut man sich die Differenz an, so wird mit einem Puls interferiert, der Amplitude  $SU = U_{max} - U_g$   
 $\Rightarrow \Delta(SU) = \sqrt{\Delta U_{max}^2 + \Delta U_g^2}$  hat.

$$\Rightarrow SU = (9 \pm 0,71) V$$

Dies entspricht also dem reflekttesten (und damit gedämpften) Signal. Für die spezifische Dämpfung erhält man damit:

$$V = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \text{ dB} \Rightarrow \Delta V = \sqrt{\left(20 \frac{1}{U_1} \cdot \Delta U_1\right)^2 + \left(20 \frac{1}{U_2} \cdot \Delta U_2\right)^2}$$

$$\begin{matrix} U_1 = U_{max} \\ U_2 = SU \end{matrix} \Rightarrow V = (-1,743 \pm 1,821) \text{ dB}$$

Was also Wert absolut nicht akzeptabel ist, da sowohl der Fehler viel zu groß ist, als damit auch für Sokkz nicht annähernd der Literaturwert aus Abs. 1.10 errechnet wurde, denn  $V_s = \frac{V}{l} = (1,245 \pm 1,3) \frac{\text{dB}}{\text{m}}$  mit  $l = 1,4 \text{ m}$  (Hin- und Rückweg).

*Attenuation should be measured:*

1. single frequency  $\rightarrow$  sine wave input
2. Transmission line terminated properly

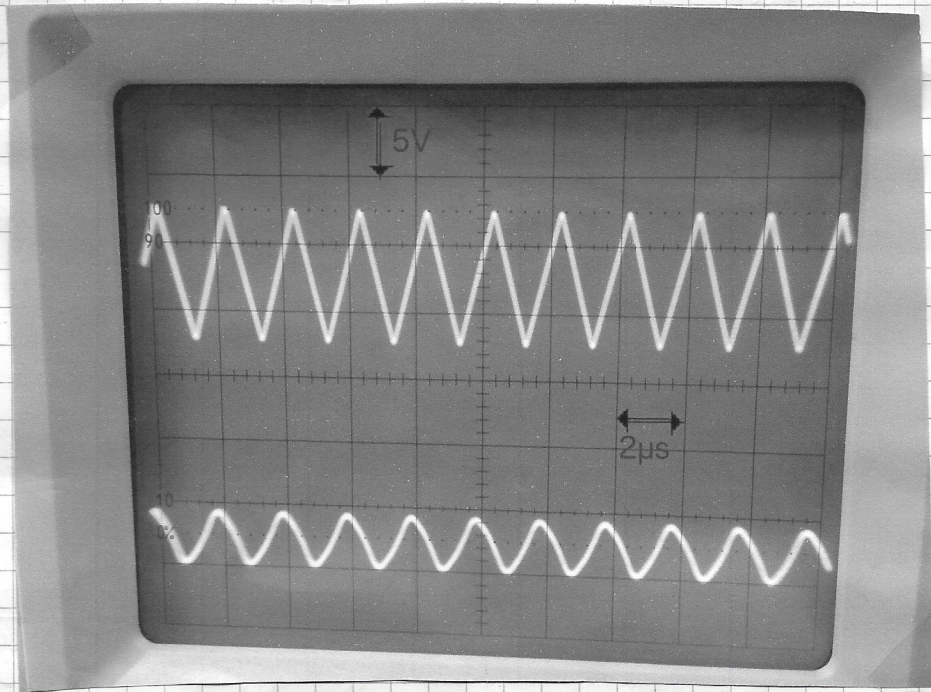
Teil 5

a) Nach der Fourier-Zerlegung bestehen Rechtecksignale aus sehr vielen unterschiedlichen Frequenzen. Gerade für die Kanten mit riesengroßer Steigung werden sehr hohe Frequenzen gebraucht. Dadurch macht sich eine kleine Bandbreite <sup>hier</sup> sehr schnell bemerkbar in Verzögerungsbereich und verfälscht



das Signal.

- b) Legt man beide Signale (vom  $50\Omega$  B6-58 C/6 Kabel und vom H+ 2500) gleichzeitig auf dem Oszilloskop in channel 1 und 2, so erhält man:



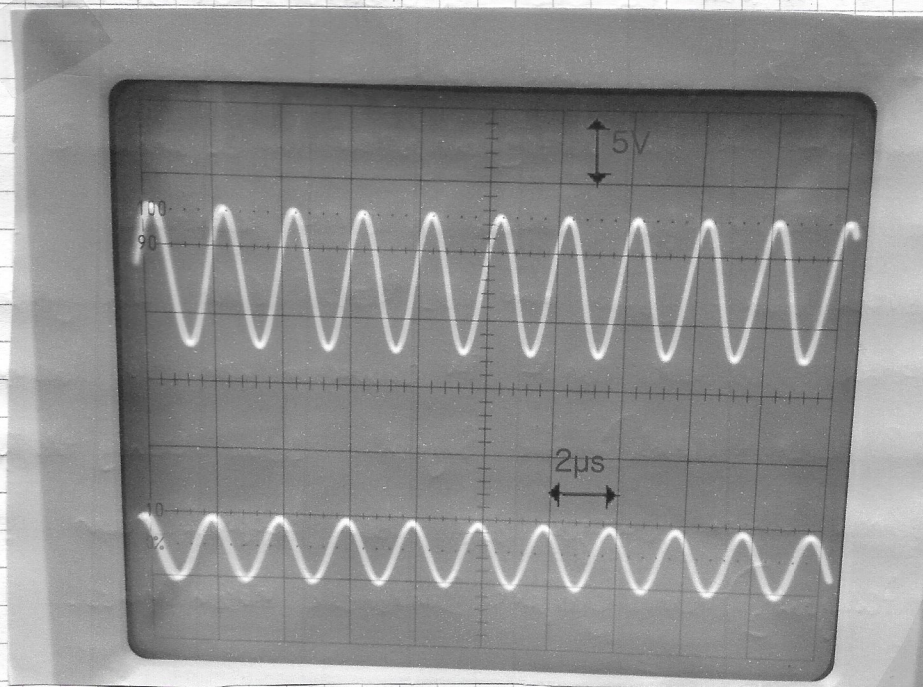
bei der Frequenz  $\nu = 500\text{kHz}$ .

Das Signal in channel 2 (unten) ist deutlich gedämpft wegen dem größeren Widerstands des H+ 2500 Kabels.

Außerdem wird dieses Signal allmählich runder statt eckig und beschreibt damit keinen Sägezahn mehr sondern einen Sinus. Damit stellt  $\nu = 500\text{kHz}$  diese „Grenzfrequenz“ dar. Für eine „eckigere“ Darstellung bräuhde man eine größere Bandbreite um den Sägezahn besser durch trigonometrische Funktionen modellieren zu können.

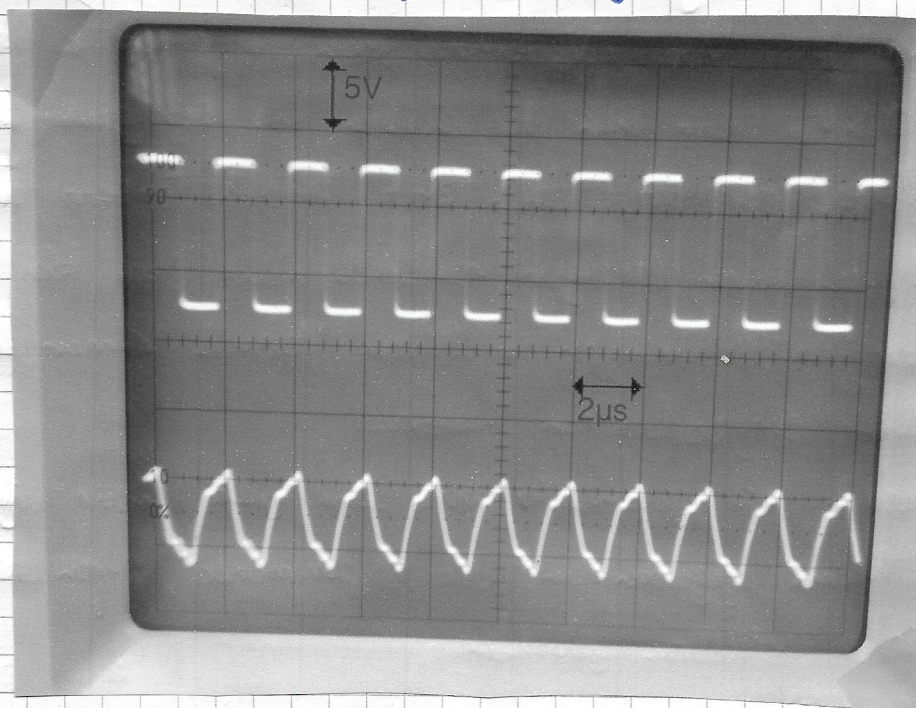
- c) Bei dieser Aufgabe wird nochmal deutlich, dass das Signal für noch größere Frequenzen immer abgerundeter und damit zum Sinus wird. Unser Bild entspricht allerdings bereits  $\nu = 500\text{kHz}$  (s.o.)

d) Das Oszillogramm für die Sinus Signalform:



welche natürlich auf beiden Kanälen wie ein Sinus aussieht.  
Auf Kanal 2 ist das Signal wegen des größeren Widerstands  
gedämpft.

Das Rechtecksignal hat folgendes Oszillogramm:



Auch hier wird wieder deutlich, dass das Kabel HH 2500  
ab einer bestimmten Frequenz nicht mehr in der Lage  
ist, das Rechtecksignal korrekt darzustellen, da seine Bandbreite  
zu klein ist.

e) Hieran guckt man sich die Verzögerungszeit an. Nach  $B_{\text{st}} = 0,35$  folgt damit auch die Bandbreite. Offensichtlich ist die Verzögerungszeit für Channel 2 (Htt 2500) größer, womit es eine kleinere Bandbreite hat. Damit hat das RG58 C/U die größere Bandbreite, was aber auch zu erwarten war, da Channel 1 (RG58 C/U - Kabel) die Signale sehr wenig verfälscht und damit schon (wegen der eben besprochenen Fourier-Ärgerung) eine größere Bandbreite haben muss.

Fazit: Auch wenn der Versuch selbst ohne große Probleme ablief, haben wir einige grobe Fehler gemacht. So haben wir unser Oszillogramm anscheinend falsch kalibriert, denn bei Amplitude  $U_{pp} = 1V_{pp}$  erhält man im ersten Teil bspw. bloß  $0,5V_{pp}$  wenn man die Kästchen mit der gewählten  $0,1V$  Skala per Hand durchzählt. Dadurch ändern sich unsere qualitativen Aussagen natürlich nicht, aber bei den wenigen Rechnungen in diesem Versuch können sich so Fehler eingeschlichen haben.

Der Versuch hat jedenfalls eine sehr gute Einführung in das Thema gegeben und die Experimente haben sehr gut beim Verständnis gehalten.

accepted

2/2/10