

1 Organisatorisches

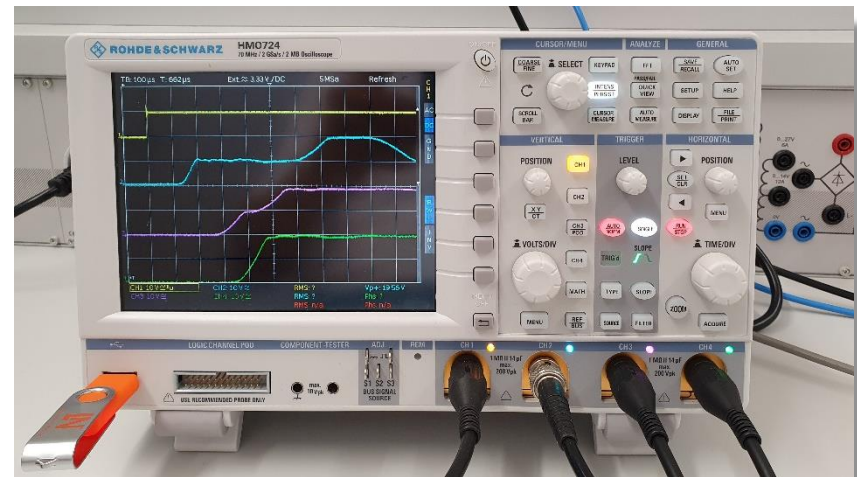
- ✓ Protokollabgabe: spätestens 2 Wochen nach Versuchsdurchführung per Mail bei Prof. Schmidt

2 Versuchstechnik

✓ Oszilloskop

Für die Bedienung sind Fachkenntnisse erforderlich. Die intuitive Bedienung - „irgend eine Taste muss doch das gewünschte Ergebnis liefern“ - ist hier nicht zielführend.

Mit Hilfe von Videosequenzen können Sie sich an die notwendigen Bedienschritte für relevante Messaufgaben heranführen lassen. Auf den Seiten des Labors Grundlagen der Elektrotechnik finden Sie Links zu den Videos und auch die Bedienungsanleitung: <https://ei.hszg.de/fakultaet/labore/bereich-elektrotechnik/labor-grundlagen-der-elektrotechnik.html>



✓ DC Konstanter 2x 0-30 V/0-10 A

- Es stehen zwei voneinander unabhängige Ausgänge 0-30 V/0-10 A zur Verfügung, mit einer der Beiden wird die benötigte Gleichspannung bereitgestellt.
- 1x PRESET drücken, Sollwert $U = 10\text{ V}$ einstellen
- 2x PRESET drücken, Abschaltschwellen für Überspannung und Überstrom einstellen (OVP(OP), Schutzwerte müssen über den Sollwerten liegen)
- ON/OFF drücken und die vorgewählte Spannung liegt an



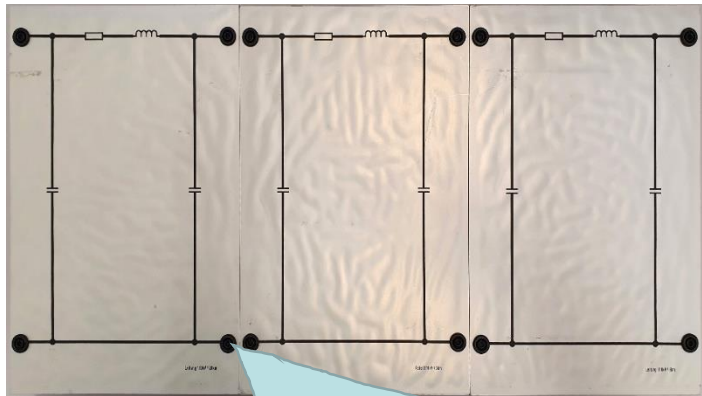
✓ Leistungsschaltermodell

- Das Leistungsschaltermodell wird in diesem Versuch nur als einfacher Ein-/Aus-Schalter verwendet
- Der Triggerausgang wird genutzt, um beim Auslösen des Schalters zugleich die Aufzeichnung des Oszilloskops zu starten (externe Triggerung des Oszilloskops)



✓ Leitungsnachbildungen

- Die die Betriebsgrößen des einpoligen Ersatzschaltbildes der Freileitungen/Kabel werden durch Kettenschaltungen von π -Vierpolen nachgebildet
- Es stehen verschiedene Nachbildungen zur Verfügung, die sich durch die nachgebildete Leitungslänge bzw. die Leitungsart (Freileitung oder Kabel) unterscheiden
- Der Anschluss erfolgt mit 4 mm – Laborleitungen bzw. Brückensteckern
- Der Leitungstyp ist jeweils auf der Frontplatte der Leitungsbausteine angegeben



✓ Leitungsnachbildungen

- Beim Blick in die geöffnete Experimentierplatte wird die Kettenschaltung 10 von π -Vierpolen sichtbar.
- Die Größe der Bauelemente entspricht den Betriebsgrößen des durch den Vierpol nachgebildeten Leitungsabschnittes
- Die abgebildete Experimentierplatte bildet eine 110-kV-Freileitung (Länge: 20 km) nach. Demzufolge repräsentiert jeder π -Vierpol eine Leitungslänge von 2 km.
- Die Nachbildung der Freileitung durch eine Kettenschaltung ist notwendig, damit dynamische Vorgänge (z.B. Wanderwellen) untersucht werden können.



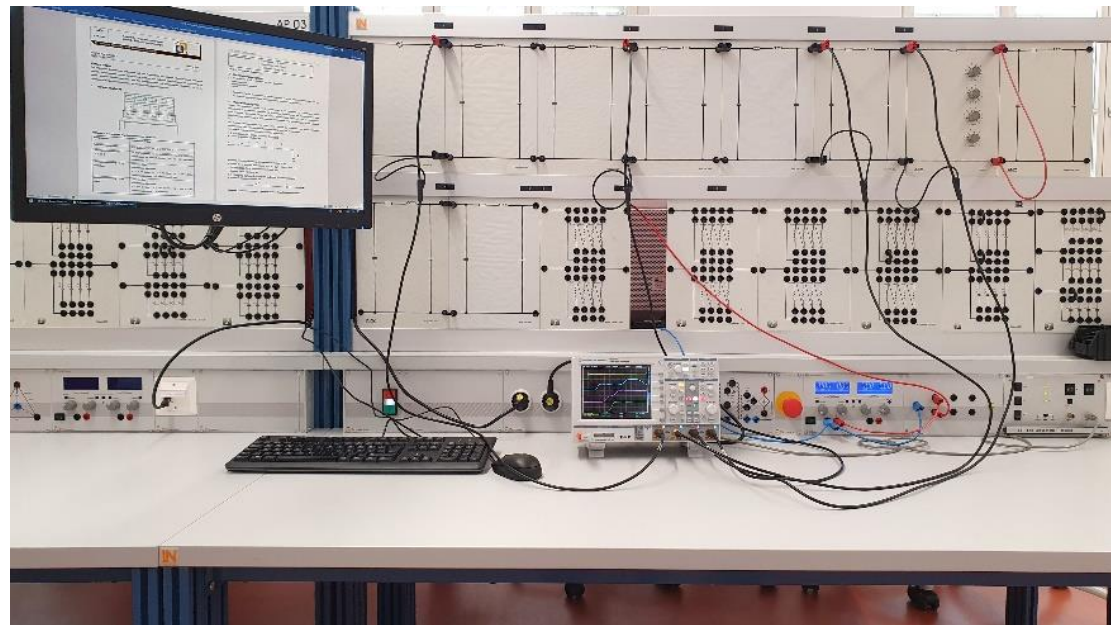
✓ Leitungsnachbildungen

- Mit der feingliedrigen Unterteilung der Leitungsnachbildung in eine Kettenschaltung von π -Vierpolen können zwar dynamische Vorgänge nachgebildet werden,
- Durch die Nachbildung der Betriebskapazität der Leitung mit diskreten Bauelementen, folgt der Potentialverlauf beim Einlauf der Spannungswelle zeitverzögert, da die Spannung über dem Kondensator nur kontinuierlich ansteigen kann. Dieses versuchstechnische Problem ist bei der Interpretation der Messwerte zu beachten.



✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz

- Die Experimentierplatten werden entsprechend den Versuchsaufgaben zusammengestellt.
- Die angegebenen Messpunkte auf den Leitungen sind an das Oszilloskop anzuschließen
- Der Abschlusswiderstand am Leitungsende wird nach Vorgabe eingestellt.
- Über das Leistungsschaltermodell wird die Gleichspannung zugeschaltet und zugleich die externe Triggerung des Oszilloskops ausgelöst.



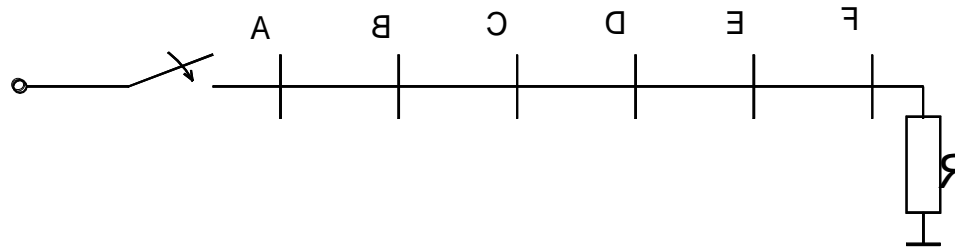
3 Versuchsvorbereitung

✓ Charakteristischen Größen für die Wellenausbreitung

	Freileitung 110kV	Kabel 110kV
R'	0,14Ω / km	0,044Ω / km
X'_b	0,45Ω / km	0,181Ω / km
$\rightarrow L'_b$	1,43mH / km	0,576mH / km
C'_b	11,0nF / km	0,347μF / km
$Z_w = \sqrt{\frac{L'_b}{C'_b}}$	360,6Ω	40,8Ω
$v = \frac{1}{\sqrt{L'_b C'_b}}$	252,1m / μs	70,7m / μs
$\tau = L \cdot \sqrt{L'_b / C'_b}$	79,3μs	70,7μs

4. Versuchsaufgaben

41. Abschluss der Freileitung mit einer Resistanz

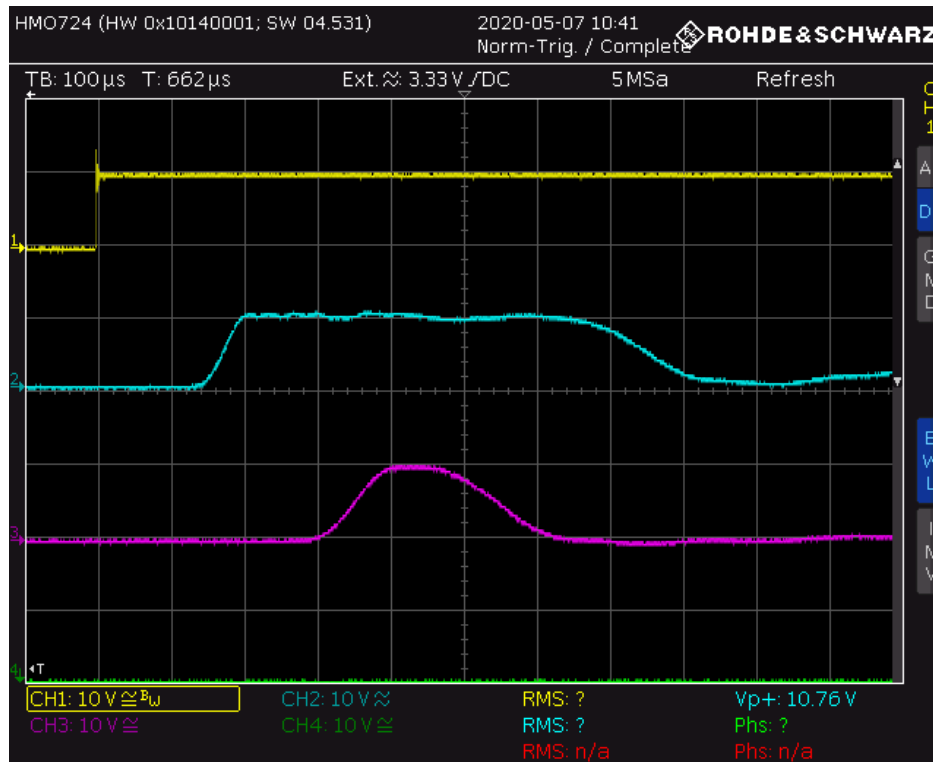
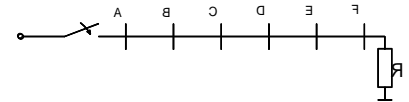


- Die Zeitverläufe der Spannungen werden an den Orten A, C, E und F oszillografiert
- Die wird jeweils für folgende Werte der Resistanz R durchgeführt: 0 ; Z_w ; $1.000\ \Omega$; ∞

4. Versuchsaufgaben

4.1 Abschluss der Freileitung mit einer Resistanz

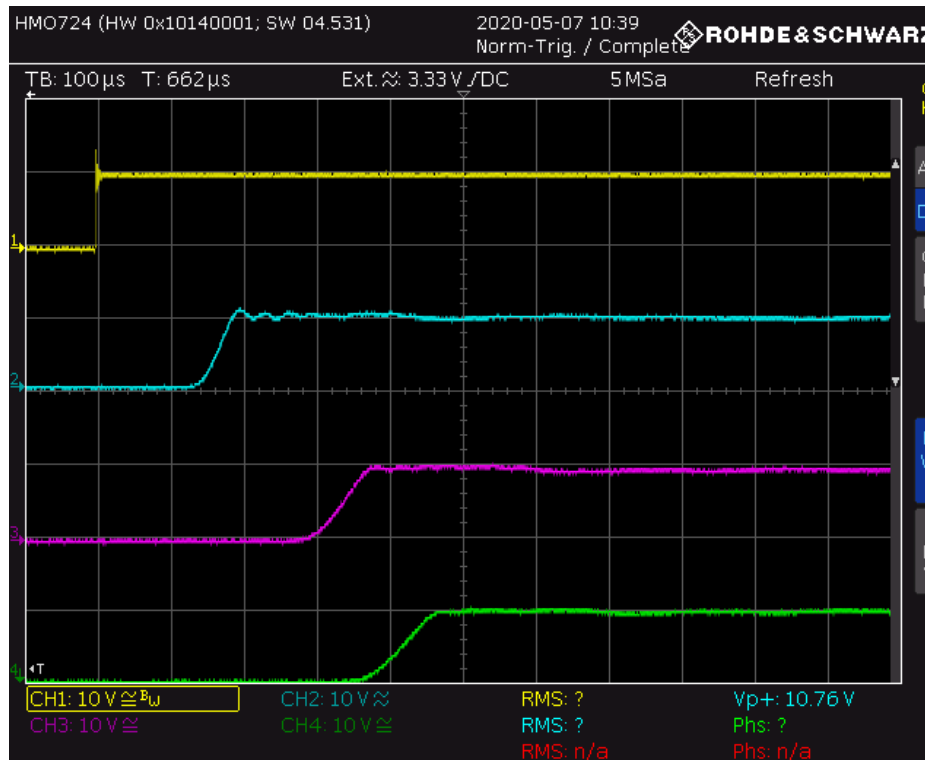
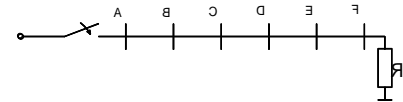
✓ $R = 0$



4. Versuchsaufgaben

4.1 Abschluss der Freileitung mit einer Resistanz

✓ $R = Z_W$



A

C

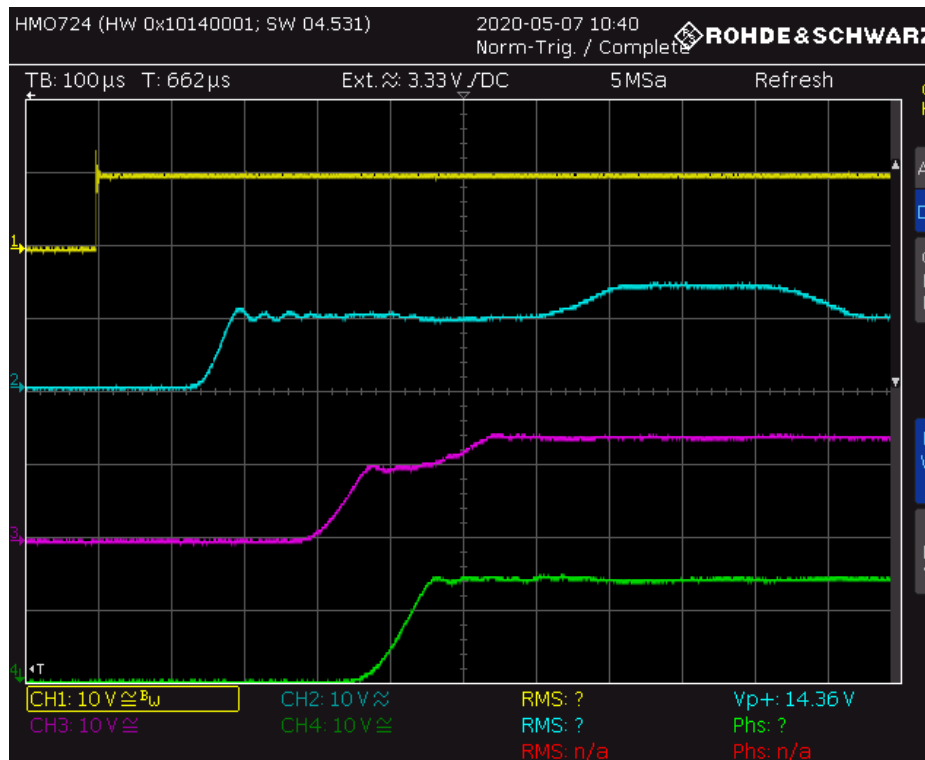
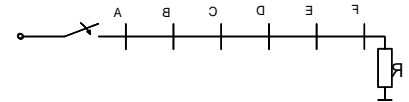
E

F

4. Versuchsaufgaben

4.1 Abschluss der Freileitung mit einer Resistanz

✓ $R = 1.000 \Omega$



A

C

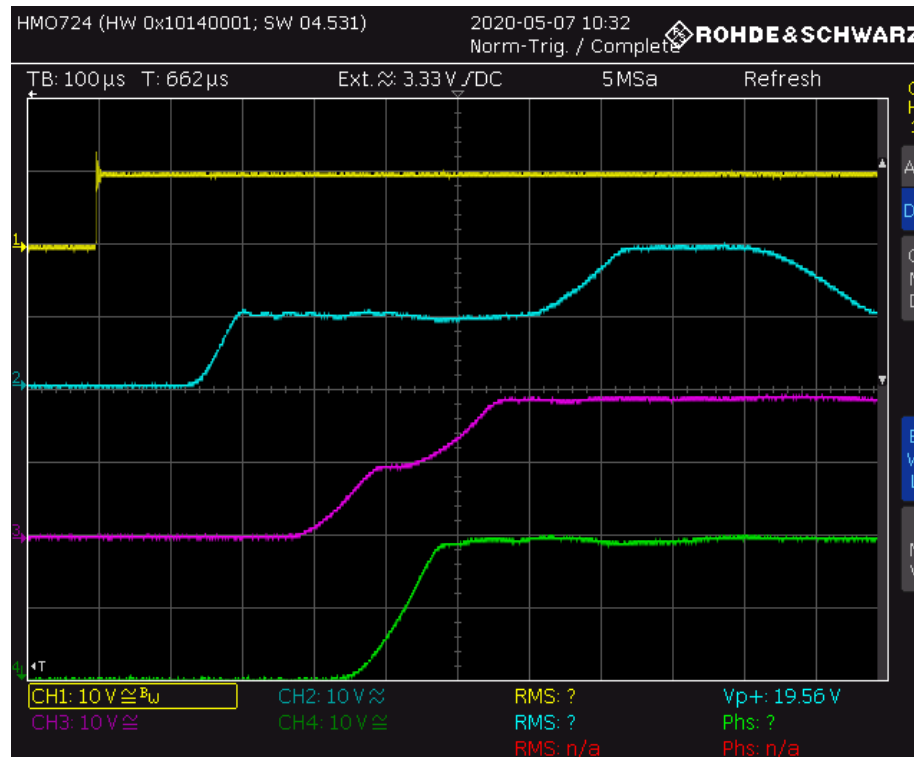
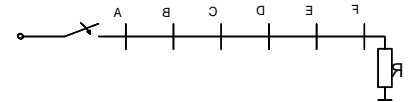
E

F

4. Versuchsaufgaben

4.1 Abschluss der Freileitung mit einer Resistanz

✓ $R \rightarrow \infty$ (offenes Leitungsende)



A

C

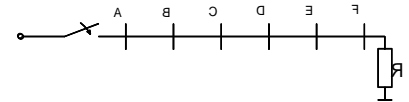
E

F

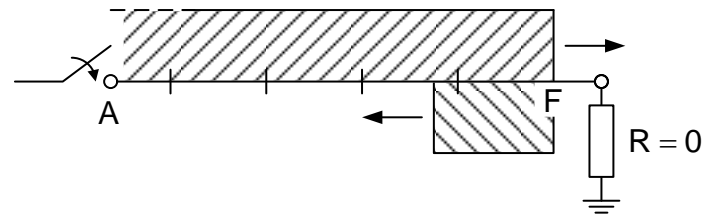
4. Versuchsaufgaben

4.1 Abschluss der Freileitung mit einer Resistanz

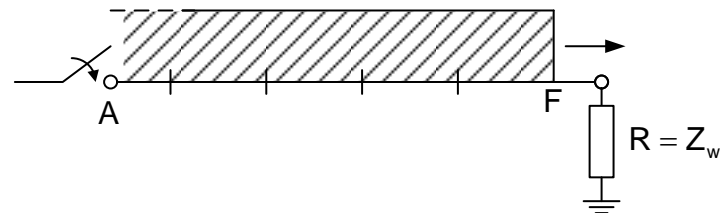
✓ Interpretation der Messergebnisse



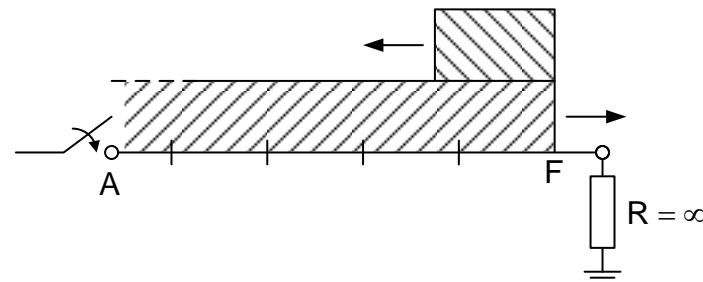
- $R = 0$: Welle mit dem entgegengesetzten Vorzeichen wird reflektiert



- $R = Z_w$: es tritt keine Reflexion auf



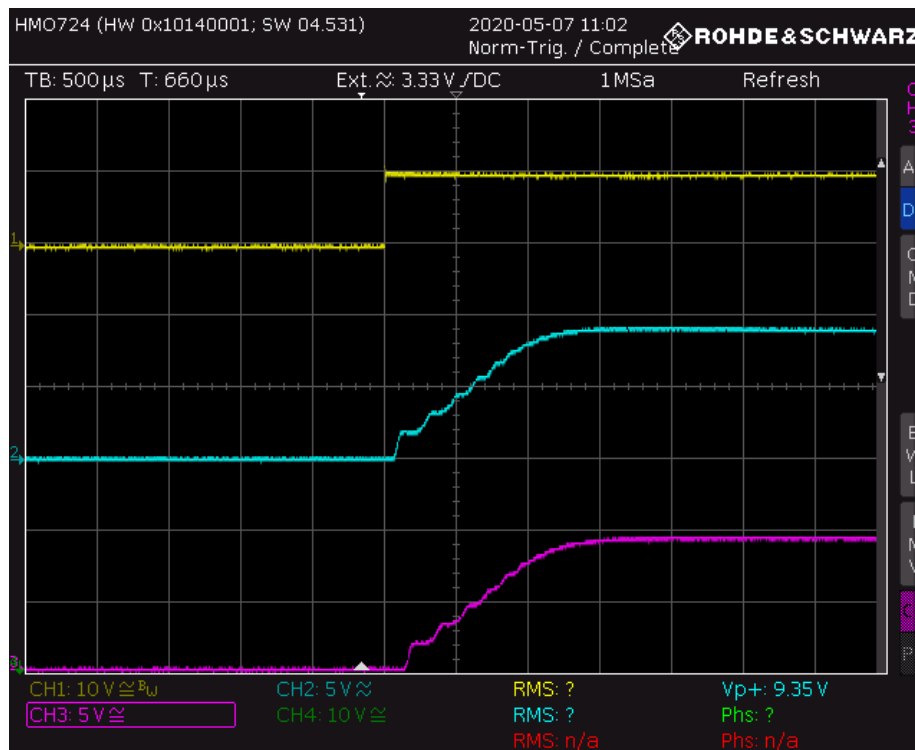
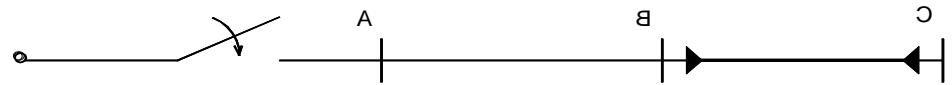
- $R \rightarrow \infty$: es tritt Totalreflexion am offenen Leitungsende auf



4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

4.2.1 Abschluss des Kabels am Ort C mit $R = Z_W$



A

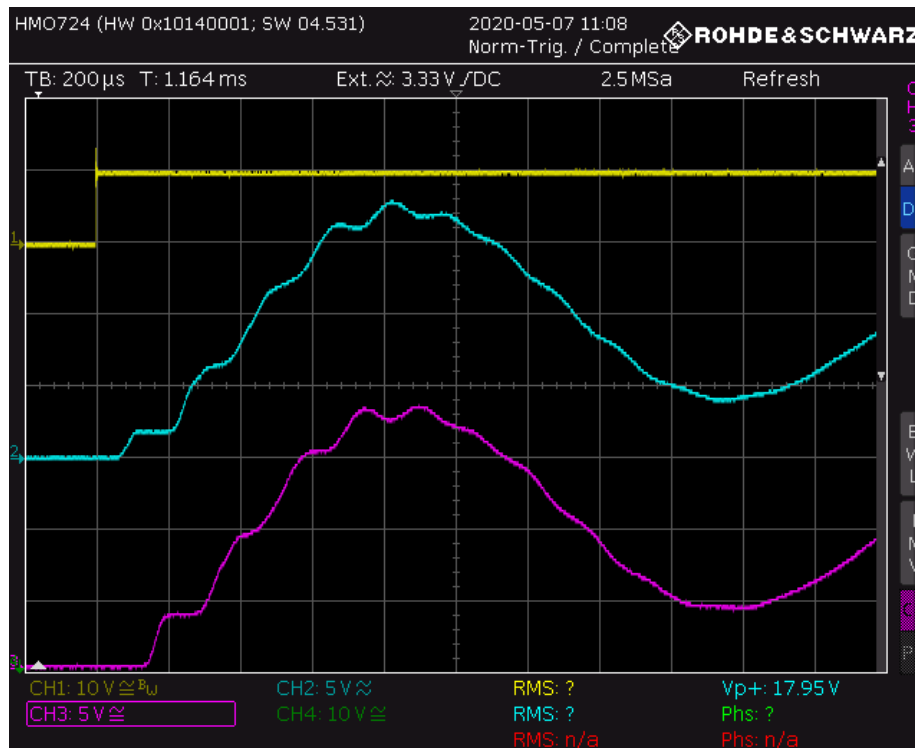
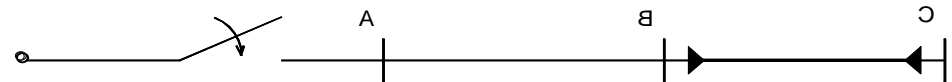
B

C

4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

4.2.2 Offenes Kabelende



A

B

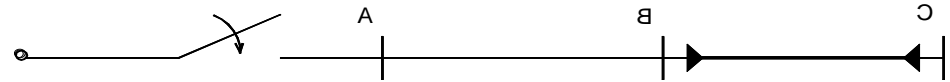
C

4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

4.2.1 Freileitung – Kabel, Abschluss mit $R=Z_W$

✓ Interpretation der Messergebnisse



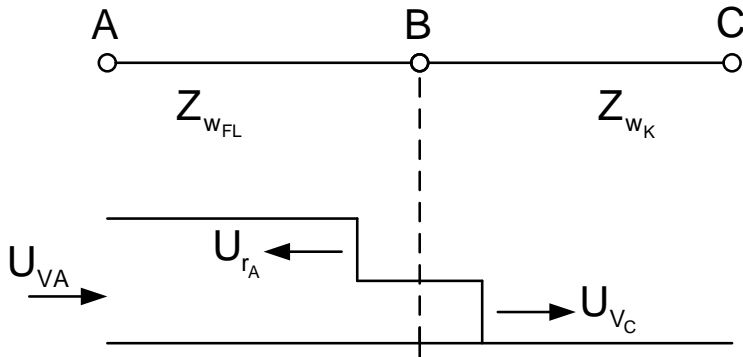
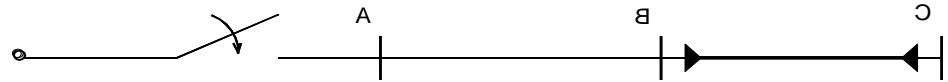
- Durch Leitungsabschluss mit $R = Z_W$ treten keine Reflexionen am Leitungsende auf, so dass die Konzentration auf den Zeitverlauf der Spannung an der Übergangsstelle in Folge von Reflexion und Brechung möglich wird
- Durch den im Vergleich zur Freileitung geringen Wellenwiderstand des Kabels wird die einlaufende Welle auf $1/5$ der ursprünglichen Amplitude gebrochen
- Der größte Teil der Welle wird reflektiert und läuft zum Leitungsanfang zurück
- Da die Spannungsquelle starr ist, startet eine neue positive Welle usw.
- Der Spannungsverlauf ähnelt (abgesehen von den Spannungssprüngen zum Zeitpunkt der Reflexion bzw. Brechung) der Ladekurve eines Kondensators mit $T=Z_W C$ und zeigt damit ähnliche Ergebnisse, wie bei einer konzentrierten Querkapazität am Leitungsende

4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

4.2.1 Freileitung – Kabel, Abschluss mit $R=Z_W$

✓ Interpretation der Messergebnisse



Berechnung:

$$U_{VC} = 2U_{VA} \cdot \frac{Z_{w_K}}{Z_{w_{FL}} + Z_{w_K}} \quad / \text{ mit } Z_{w_K} = 0,1Z_{w_{FL}}$$

$$U_{VC} = 2U_{VA} \cdot \frac{0,1}{1,1} \approx \underline{\underline{0,2 U_{VA}}}$$

Reflexion:

$$U_{rA} = U_{VA} \frac{Z_{w_K} - Z_{w_{FL}}}{Z_{w_{FL}} + Z_{w_K}} \quad / \text{ mit } Z_{w_K} = 0,1Z_{w_{FL}}$$

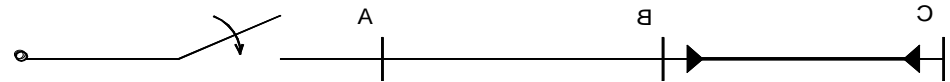
$$U_{rA} \approx \underline{\underline{-0,8U_{VA}}}$$

4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

4.2.1 Freileitung – Kabel, offenes Kabelende

✓ Interpretation der Messergebnisse

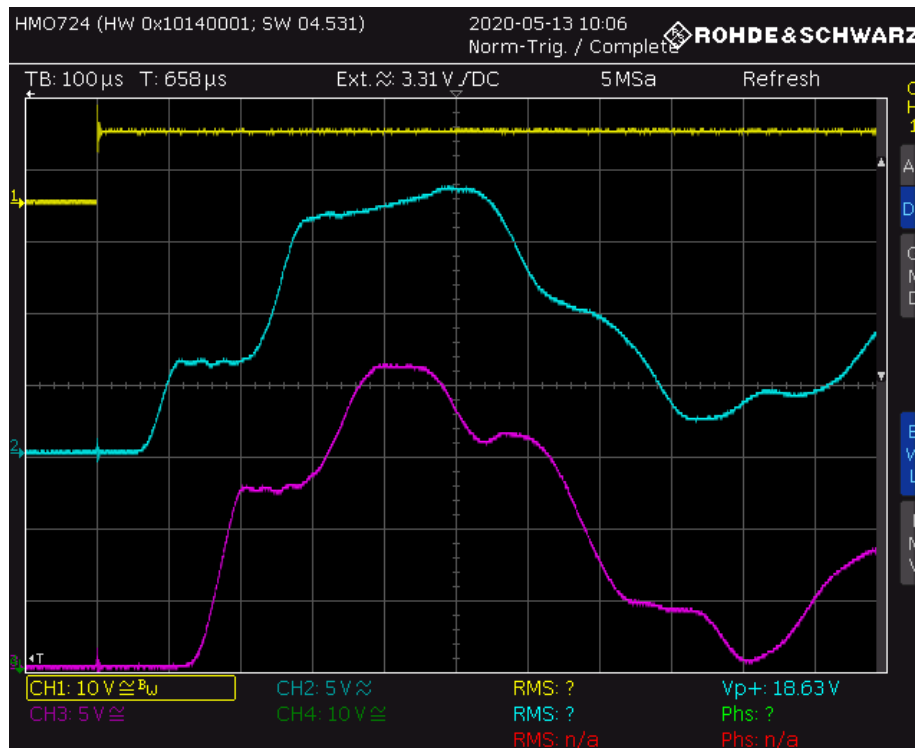


- Durch das offene Kabelende ($R \rightarrow \infty$) wird der in das Kabel einlaufende Anteil der ursprünglichen Welle am Leitungsende total reflektiert, auch die rücklaufende Welle wird an der Übergangsstelle zur Freileitung erneut gebrochen bzw. reflektiert.
- Im Ergebnis baut sich die Spannung letztlich bis zum zweifachen Wert der ursprünglich gestarteten Welle auf

4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

4.2.3 Einfachleitung – Doppelleitung



A

B

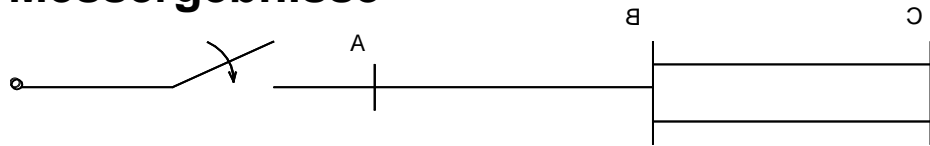
C

4. Versuchsaufgaben

4.2 Übergang auf eine Leitung mit anderem Wellenwiderstand

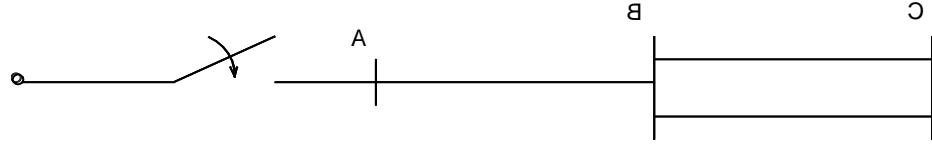
4.2.1 Einfachleitung – Doppelleitung, offenes Leitungsende

✓ Interpretation der Messergebnisse



- Der relativ geringe Unterschied der Wellenwiderstände in beiden Leitungen führt dazu, dass der größte Anteil der einlaufenden Welle an der Übergangsstelle gebrochen wird.
- Nur ein kleiner Teil der einlaufenden Welle wird reflektiert.

✓ Interpretation der Messergebnisse

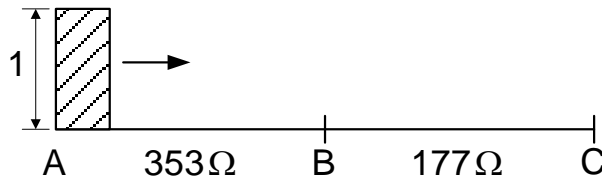


Zeitpunkt

Darstellung der Wanderwellen
(Spannungswellen)

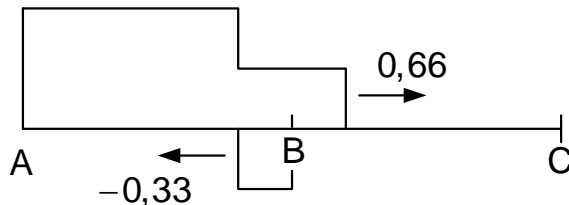
Kommentar

$0 < t < 1\tau$



Welle wird mit normierter Amplitude 1
von A aus gestartet
($U_A = 1 = \text{const.} \rightarrow \text{starre Spannungsquelle}$)

$1\tau < t < 2\tau$

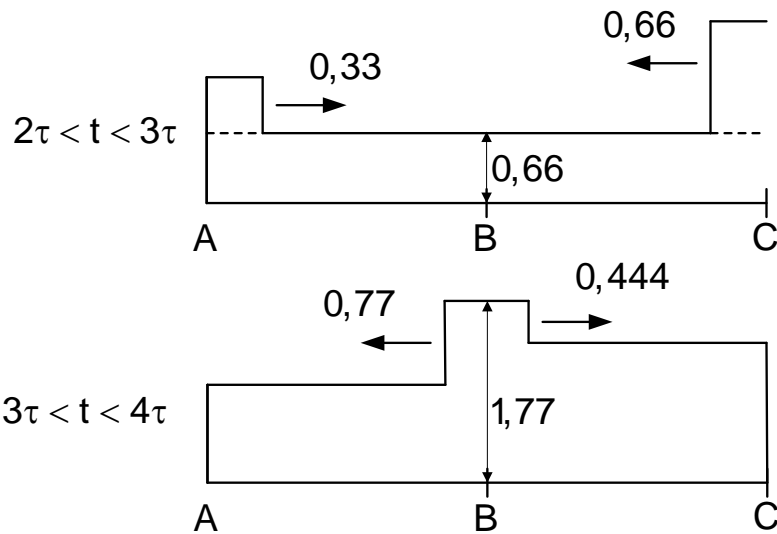
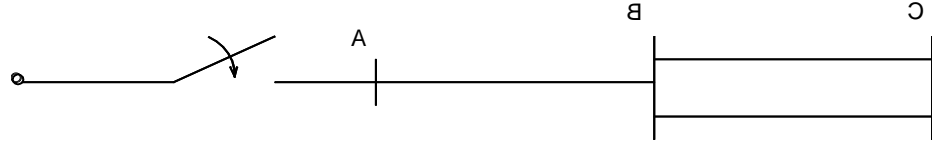


Beim Erreichen von B erfolgt Brechung der Welle
sowie Teilreflexion. Für Welle A nach B gilt:

$$\text{Brechungs faktor der Spannung } b = \frac{2 \cdot Z_{w_2}}{Z_{w_1} + Z_{w_2}} = 0,66\bar{6}$$

$$\text{Reflexionsfaktor der Spannung } r = b - 1 = -0,33\bar{3}$$

✓ Interpretation der Messergebnisse



Für das gleichzeitige Eintreffen der Wellen in B ist die getrennte Betrachtung der Wellen und die anschließende Überlagerung der Ergebnisse zweckmäßig. Das Bezugspotential wird dabei auf das bereits vorhandene Potential an B festgelegt. Es gilt

Welle von A nach B

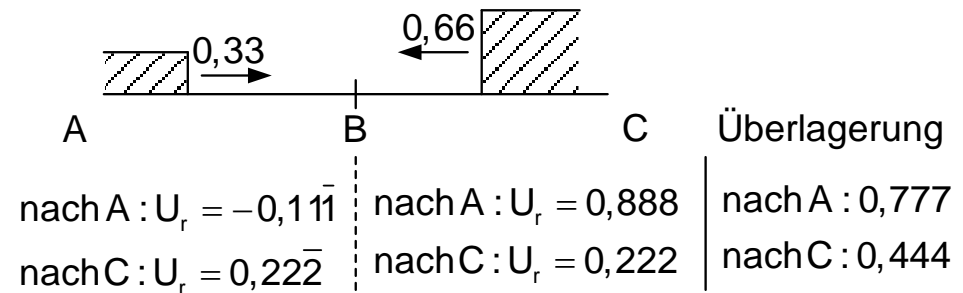
$$b = 0,66\bar{6} \text{ (s.o.)}$$

$$r = -0,33\bar{3} \text{ (s.o.)}$$

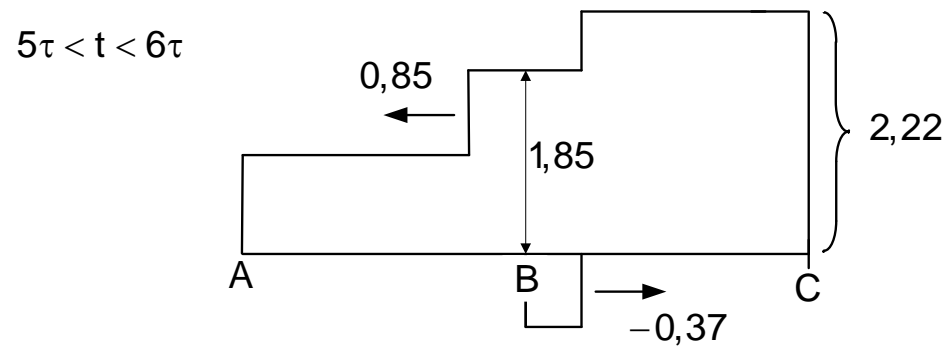
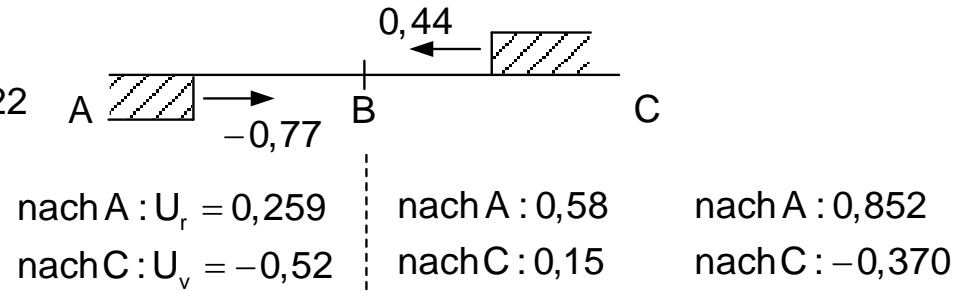
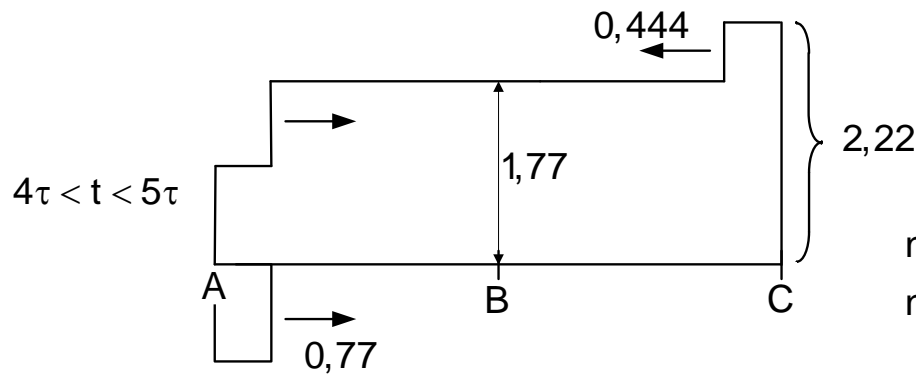
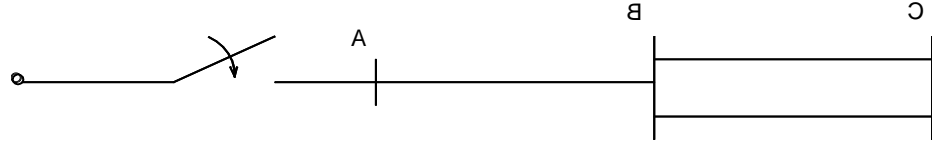
Welle von C nach B

$$b = 1,33\bar{3}$$

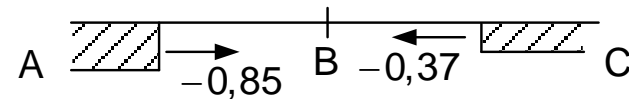
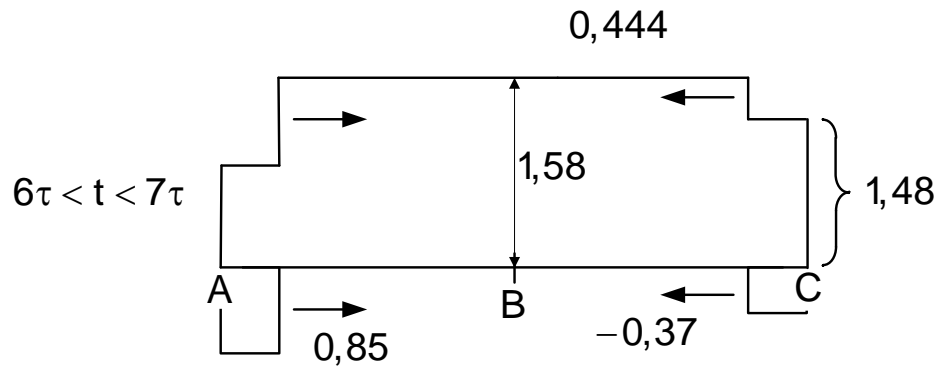
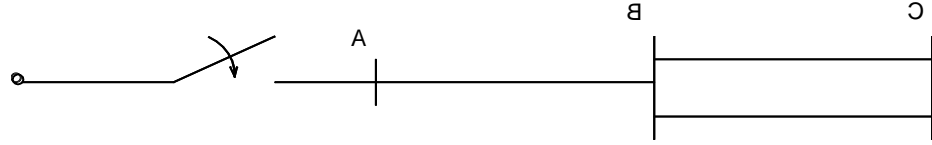
$$r = 0,33\bar{3}$$



✓ Interpretation der Messergebnisse

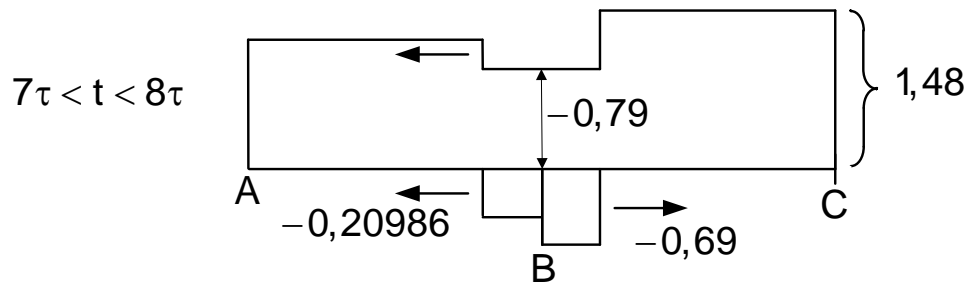


✓ Interpretation der Messergebnisse



nach A : $0,28 + (-0,49) = -0,21$

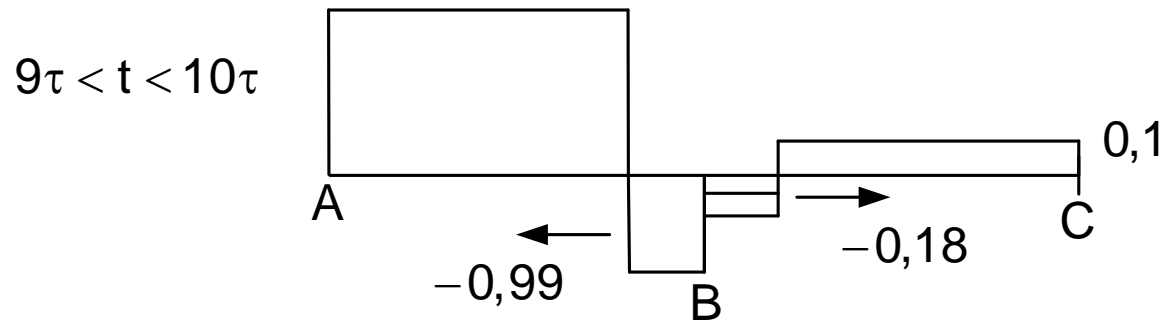
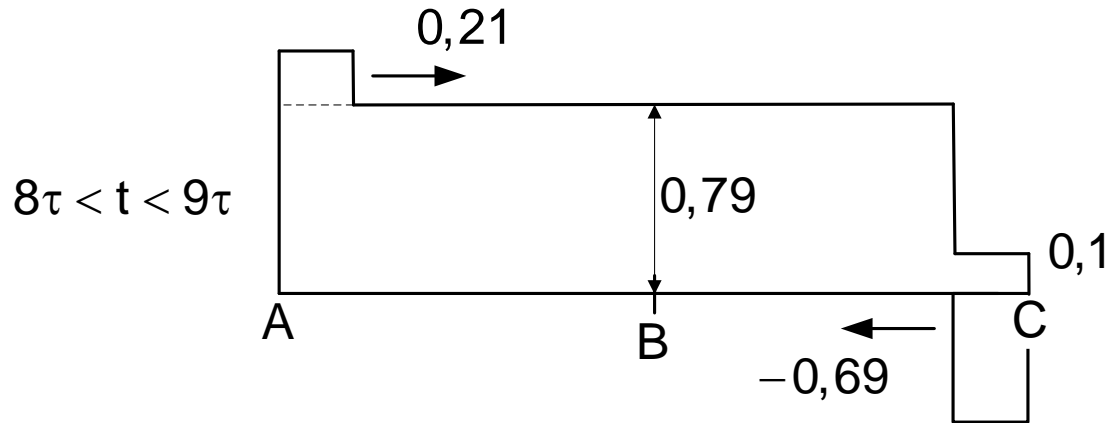
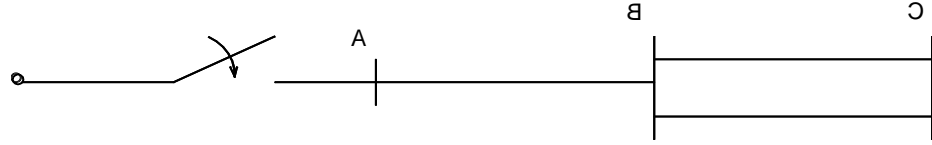
nach C : $-0,57 - 0,12 = -0,69$



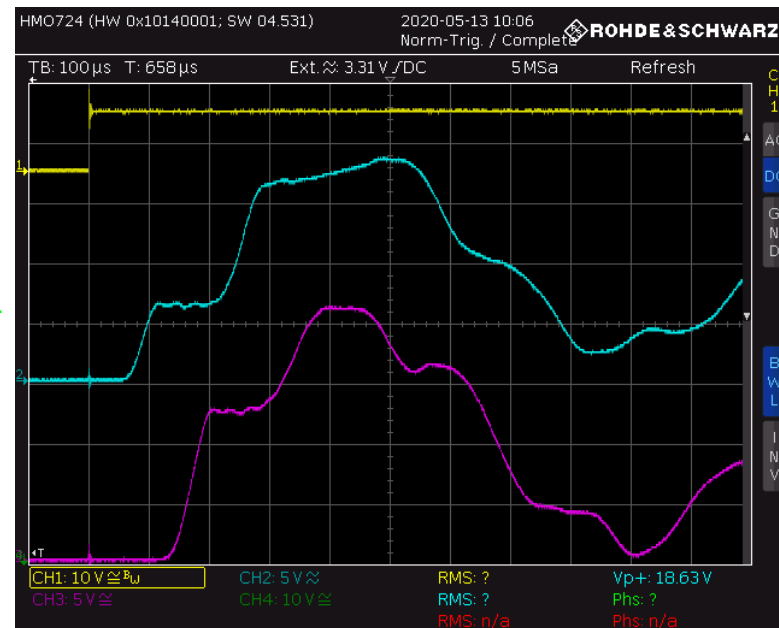
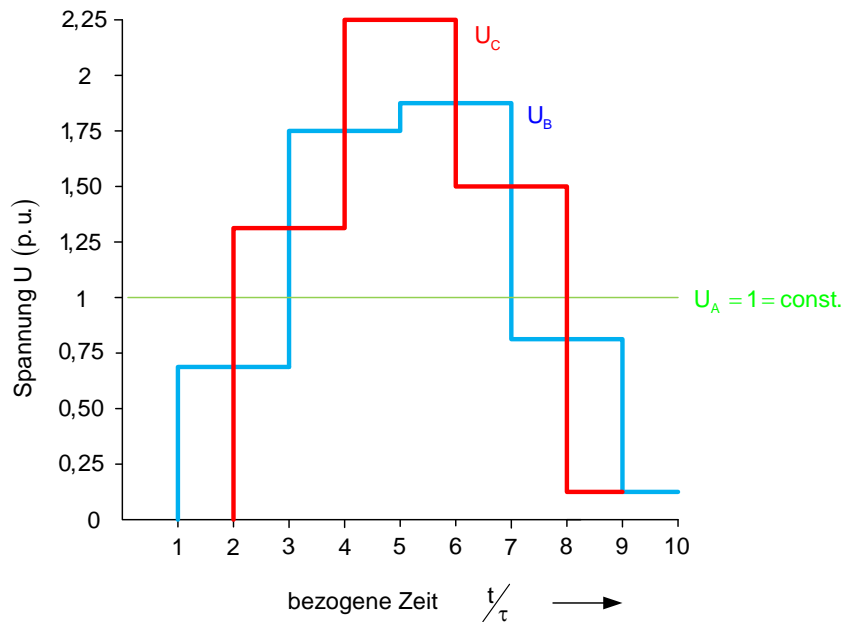
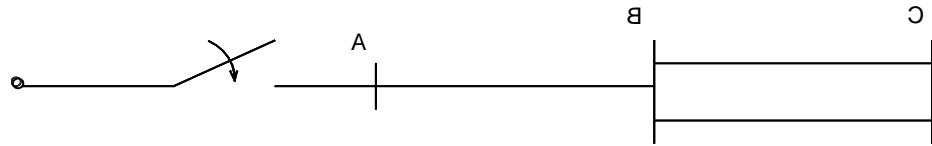
Hinweis: an A wird stets eine Welle mit der Amplitude gestartet, daß die Bedingung $U_A = 1 = \text{const}$ erfüllt wird

an C wird stets die einlaufende Welle total reflektiert ($Z_w \rightarrow \infty$, offenes Ende)

✓ Interpretation der Messergebnisse



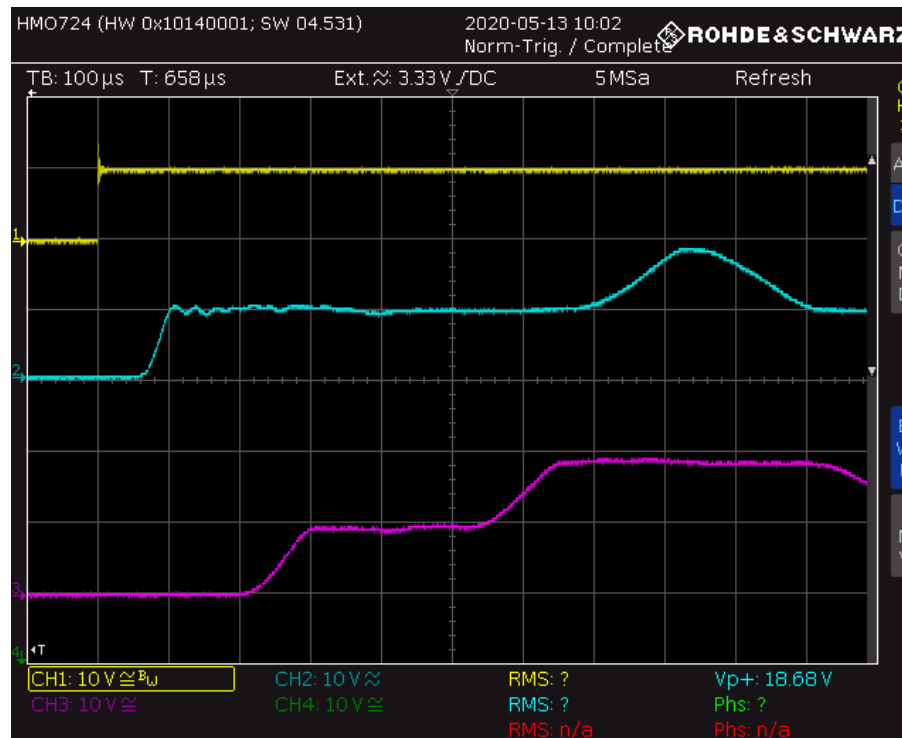
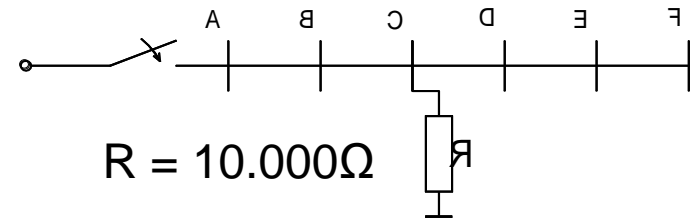
✓ Interpretation der Messergebnisse



- Der Infolge der Brechung und Reflexion an der Übergangsstelle kann die Spannung am offenen Ende sogar noch über den Wert von 2 p.u. hinaus ansteigen
- Die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung ist gut

4. Versuchsaufgaben

4.3 Übergangsstelle mit konzentrierten Elementen



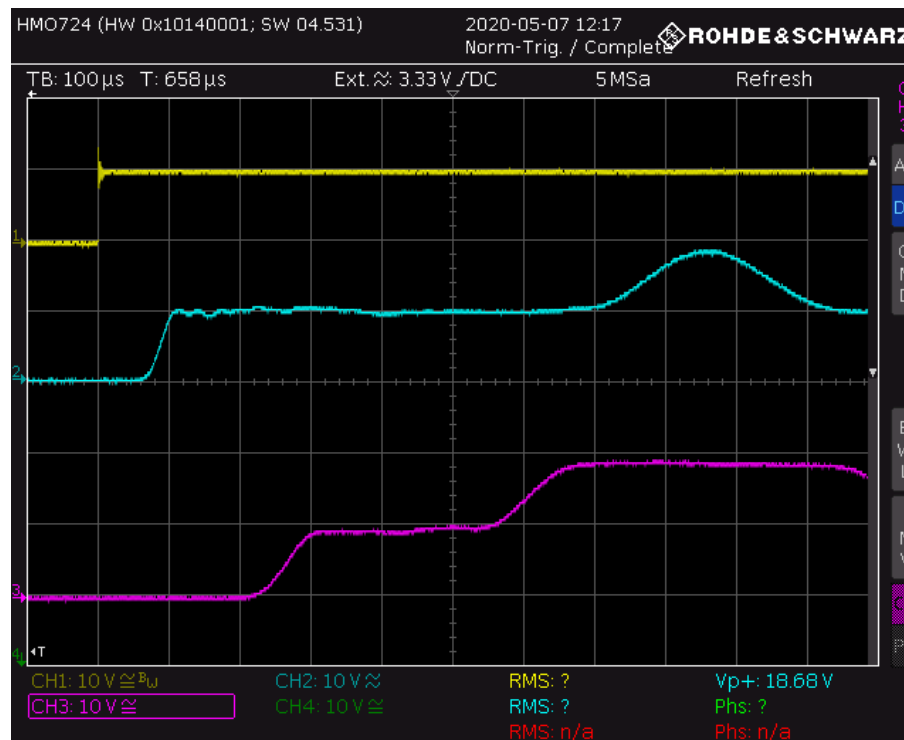
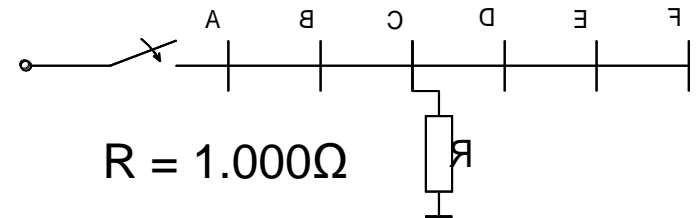
A

B

D

4. Versuchsaufgaben

4.3.3 Übergangsstelle mit konzentrierten Elementen



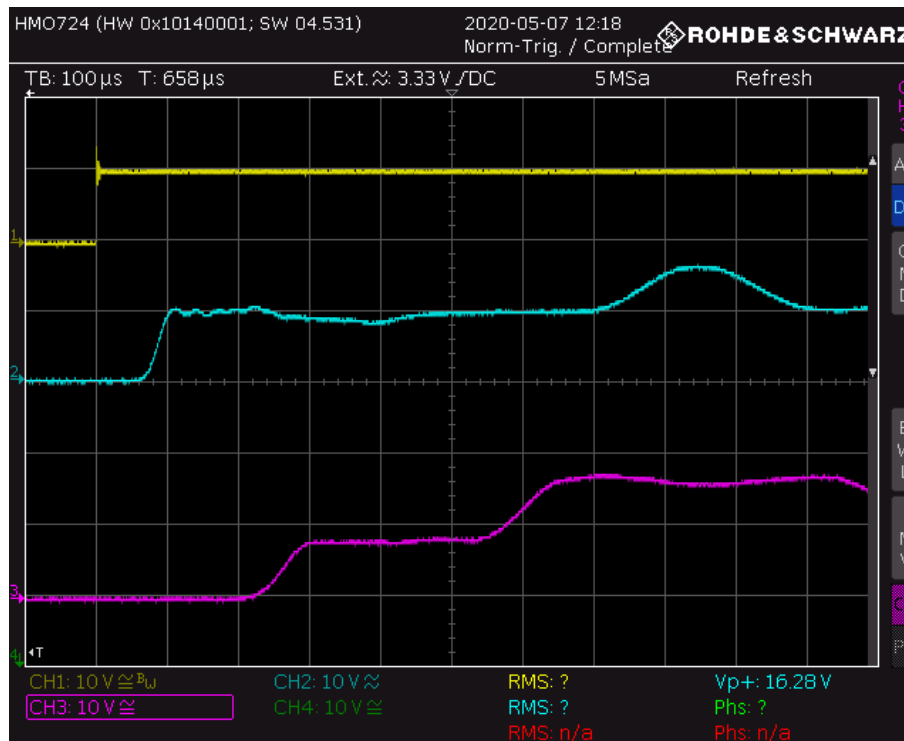
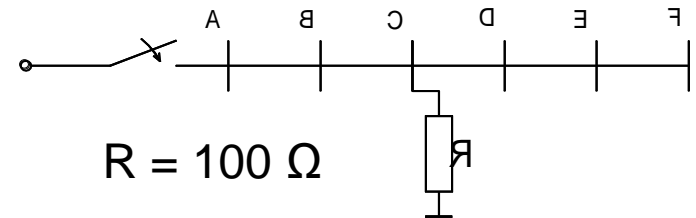
A

B

D

4. Versuchsaufgaben

4.3.3 Übergangsstelle mit konzentrierten Elementen



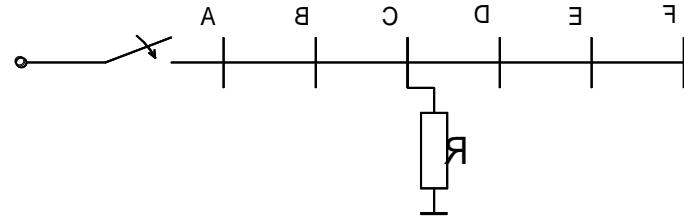
A

B

D

4.3.3 Übergangsstelle mit konzentrierten Elementen

✓ Interpretation der Messergebnisse



Sowohl die Amplitude der vorlaufenden, als auch der rücklaufenden Spannungswelle wird mit abnehmender Querresistanz immer weiter reduziert (Prinzip des Überspannungsableiters)