

TIME DOMAIN REFLEKTOMETRIE (TDR) DER BLICK INS KABEL

ARP 2020

DF5HC, JENS

INHALT

- Einleitung ins Thema TDR
- Theorie auf Leitungen
- TDR Generatoren (Schaltungen)
- Messungen

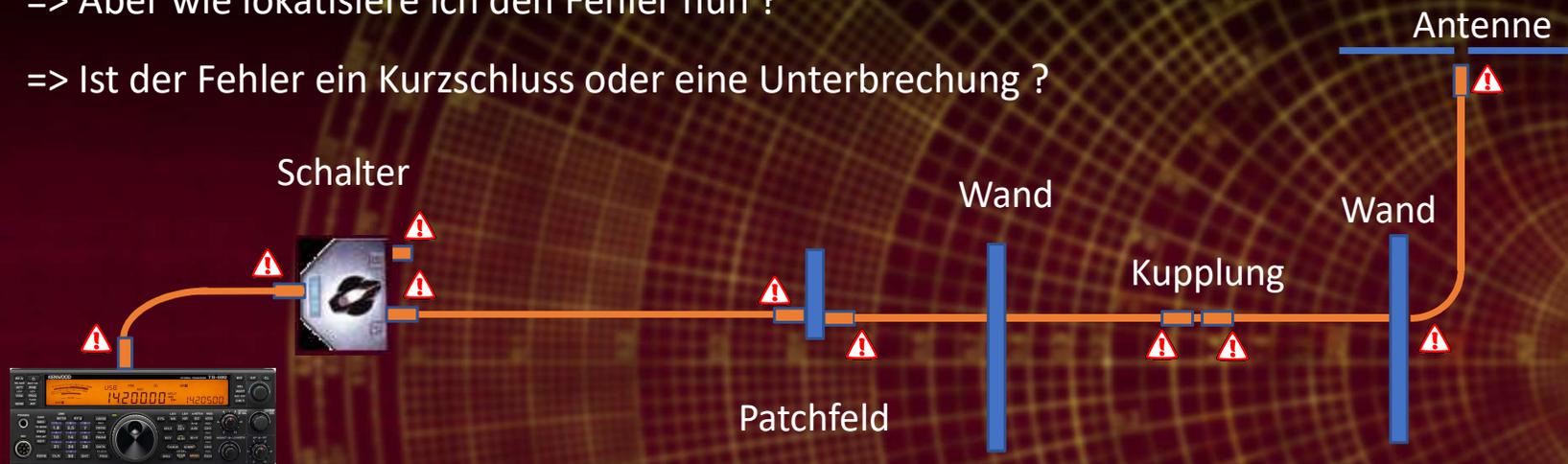
EINLEITUNG INS THEMA TDR

Typische Problemstellung:

Das Kabel zur Antenne hat ein **hohes SWR**, obwohl die Antenne in Ordnung ist.

=> Aber wie lokatisiere ich den Fehler nun ?

=> Ist der Fehler ein Kurzschluss oder eine Unterbrechung ?



Ursachen und Positionen sind vielfältig und oft unzugänglich.

Was machen wenn z.B. kein Ohmmeter vom Transceiver zur Antenne ansetzen kann, um eine Unterbrechung zu messen ?

TIME DOMAIN REFLEKTOMETRIE

TDR ermöglicht es nun die **Position und Art der Fehlerstelle** zu analysieren.

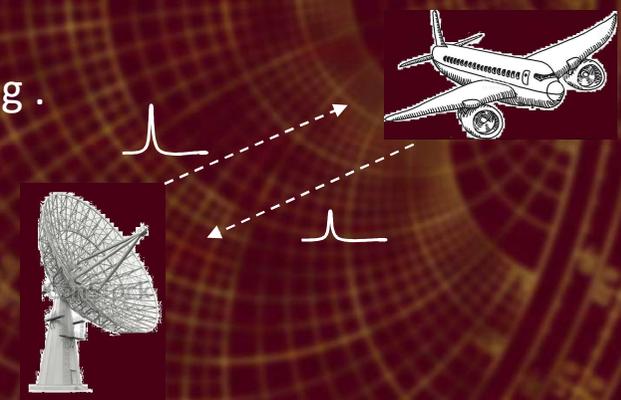
Dafür werden **Pulse** in die Leitung geschickt und auf die Echos gelauscht.

=> Die **Dauer bis zum Echo** gibt Aufschluss über die Position der Fehlanpassung

=> Die **Stärke und Vorzeichen des Echos** gibt Aufschluss über die Art der Fehlanpassung

So funktioniert auch das **primäre RADAR**.

Anstatt im Freiraum laufen die Pulse beim TDR nur auf einer Leitung .



GESCHICHTE

Die ersten Erfahrungen mit der Zeitbereichsreflektometrie wurden bereits in den **1930er** Jahren von **Smith-Rose** mit Hilfe von **Radarstrahlen** gemacht.

Angetrieben durch die Fortschritte in der Radartechnik im Zweiten Weltkrieg kam es zur Entwicklung geeigneter Messgeräte, die dann in den **1960er Jahren zu den ersten verwertbaren Geräten** führten.

Als eines der ersten Einsatzgebiete ist hierbei die Lokation von **Kabelbrüchen und Quetschungen** in der Elektrotechnik zu nennen. Diese erste Verwendung findet sich heute noch in dem Begriff **Kabelradar** wieder, der sich im deutschen Sprachraum weitläufig eingebürgert hat.

Heute wird das Verfahren auch angewendet um **Schadstellen in Glasfaserkabeln** aufzuspüren.



THEORIE AUF LEITUNGEN

AUSBREITUNG VON PULSEN AUF LEITUNGEN

Ein Puls breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit auf zwei Leitern

aus:

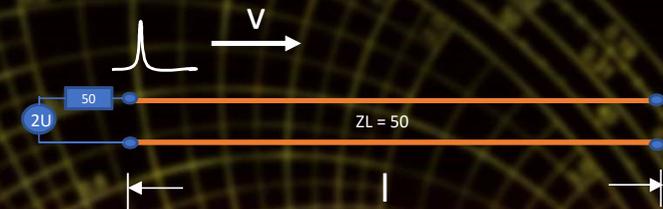
$$v = \frac{l}{t} = c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$$

Zu berücksichtigen ist noch das Dielektrikum was die Welle mit dem Verkürzungsfaktor $V_k = 1/\sqrt{\epsilon_r}$ langsamer laufen lässt. $v_k = 1/\sqrt{\epsilon_r} = 0,66$ (PVC Isolierung $\epsilon_r = 2.25$)

$$v = \frac{l}{t} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = 2 * 10^8 \text{ m/s}$$

oder nach t aufgelöst:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{l}{2 * 10^8 \text{ m/s}} = 5 \text{ ns} * l/m$$



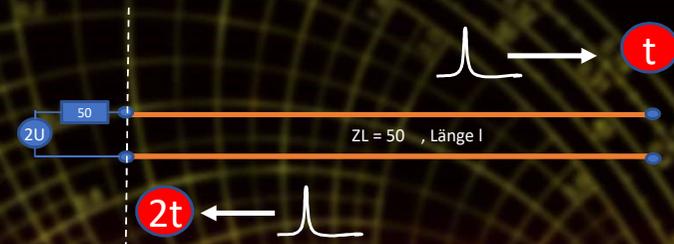
v = Ausbreitungsgeschwindigkeit
c = Lichtgeschwindigkeit ($3 * 10^8$ m/s)

l = Länge des Kabels
t = Dauer bis zum Erreichen des Endes

ϵ_r = Dielektrizitätskonstante der Isolierung
(für PVC Kabel wie RG213 = 2.25)
 v_k = Verkürzungsfaktor der Isolierung
(für PVC Kabel wie RG213 = 0.66)

ECHO DES PULSES

Da der Puls erst hin und das Echo auf der Leitung zurücklaufen muss, empfängt man das Echo am Anfang der Leitung nach der doppelten Zeit.



$$2t = \frac{2 * l}{v} = \frac{2 * l}{2 * 10E8 \text{ m/s}} = 10 \text{ ns} * l / m$$

Für PVC Isolierungen mit $v_k = 0.66$

Das Echo des Pulses erscheint also nach **10 ns**, wenn die Leitung 1 m Lang ist.

Um 10 Meter Kabel zu analysieren muss ich am Oszilloskop also ..
... 10 ns / Div einstellen wenn der Schirm 10 Teilstriche hat.

AUFLÖSUNG

Der Puls benötigt zum hin – und zurücklaufen :

$$2t = 10 \text{ ns} * l / m$$

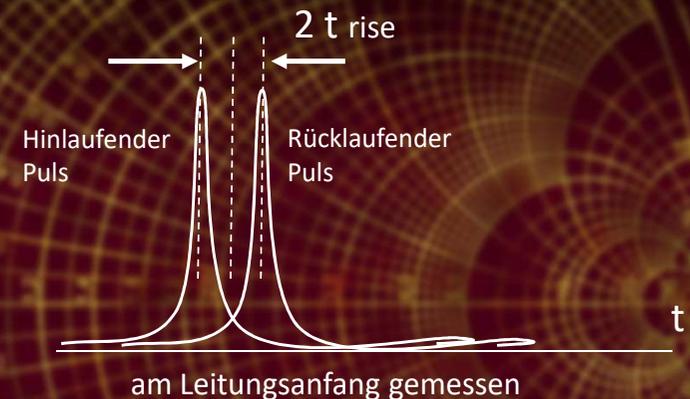
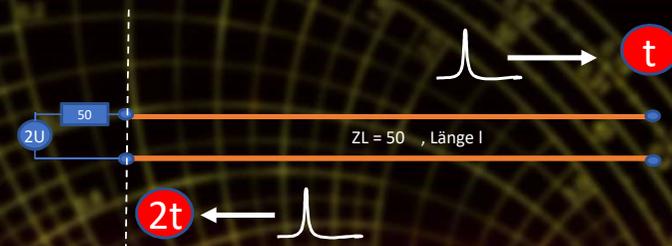
Für PVC Isolierungen mit $v_k = 0.66$

Um hinlaufenden und rücklaufenden Puls noch auseinander halten zu können müssen diese mindestens $2 t_{\text{rise}}$ auseinander liegen.

$$2 t_{\text{rise}} = 10 \text{ ns} * l_{\text{min}} / m$$

Um 1 m Auflösung zu erhalten muss also $t_{\text{rise}} < 5 \text{ ns}$ sein.

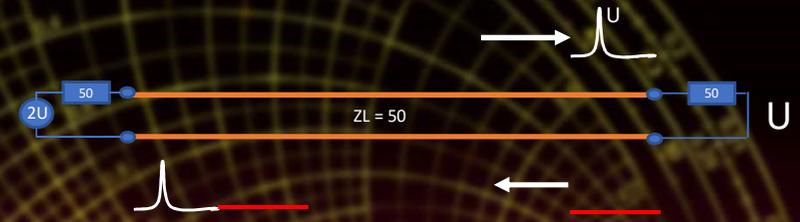
Mit Amateurmitteln sind Pulse mit $t_{\text{rise}} = 1..2 \text{ ns}$ zu erzielen, damit eine **Auflösung von ca 20..40cm**. Höhere Auflösungen sind nur mit erheblichem technischen Aufwand zu erzielen.



REFLEKTION AM LEITUNGSENDE

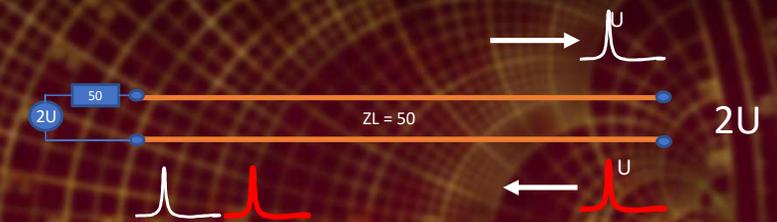
1. Abgeschlossene Leitung

Impuls wird vollständig vom Abschluss **absorbiert**, wenn der Abschlusswiderstand dem Wellenwiderstand der Leitung entspricht.



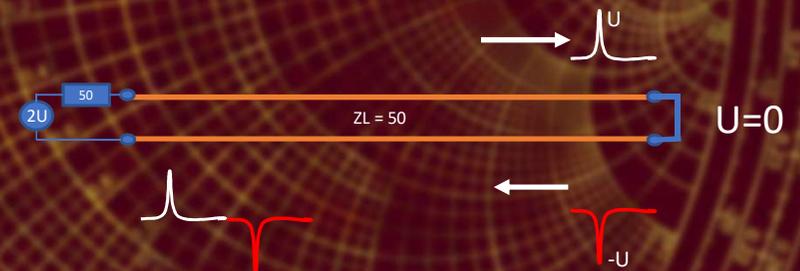
2. Offene Leitung

Totalreflektion am offenen Ende mit **gleichem Vorzeichen**



3. Kurzgeschlossene Leitung

Totalreflektion am offenen Ende mit **umgekehrtem Vorzeichen**



REFLEKTIONSFAKTOR

Der Reflektionsfaktor gibt das Verhältnis zwischen vorlaufender Spannung zu rücklaufender Spannung an. Er kann zwischen -1 und 1 sein.

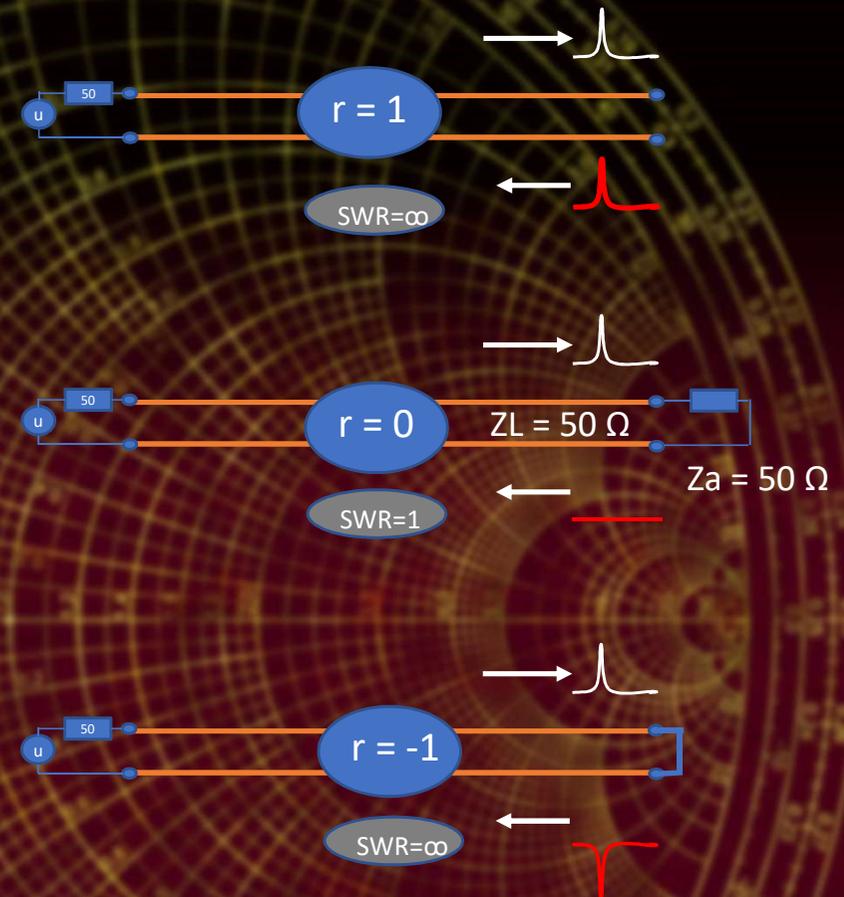
$$r = \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{vor}}} = \frac{Z_a - Z_L}{Z_a + Z_L}$$

$$r = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$$

Dieser lässt sich auch in ein im Amateurfunk übliches SWR umrechnen:

$$SWR = \frac{U_{\text{vor}} + U_{\text{rück}}}{U_{\text{vor}} - U_{\text{rück}}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{1-r}{1+r}$$

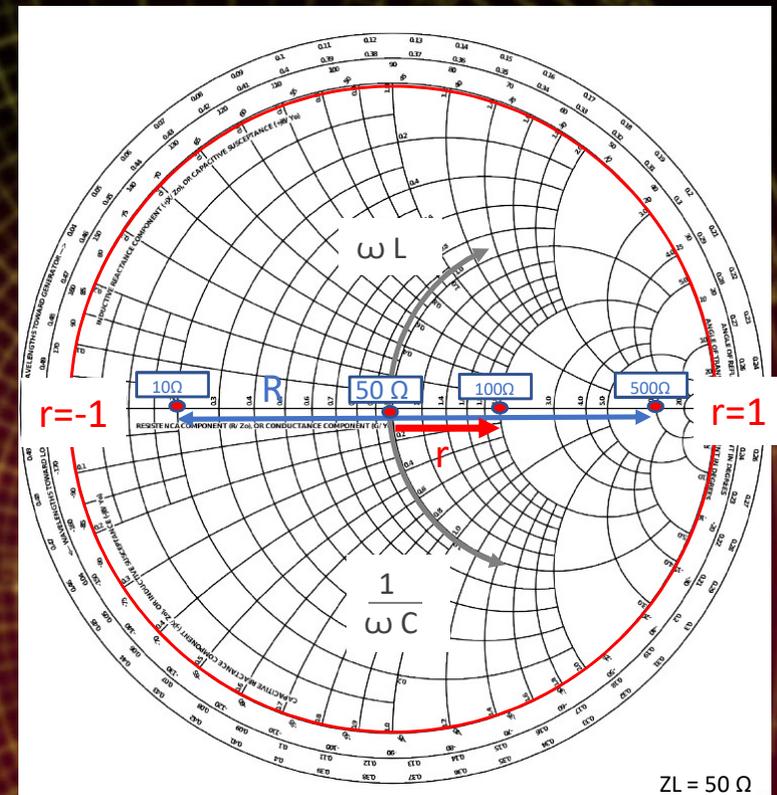
Oft haben wir es mit frequenzabhängigen Abschlüssen zu tun, somit wird SWR und Reflektionsfaktor frequenzabhängig und kann mit breitbandigen Pulsen nicht mehr gemessen werden !



SMITH DIAGRAMM

Das Smith Diagramm stellt komplexe Impedanzen in einem kreisrunden Diagramm dar.

Dabei lässt sich der Reflektionsfaktor r direkt grafisch bei bekannter Impedanz ablesen.
ganz links ist $r = -1$ / ganz rechts ist $r = 1$



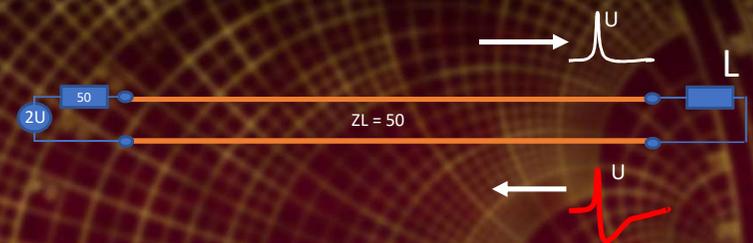
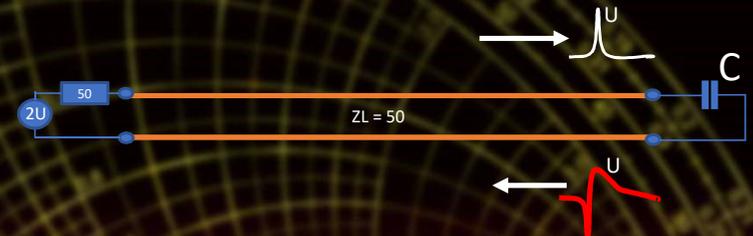
REFLEKTION MIT KOMPLEXEN IMPEDANZEN

1. Kondensator

Wirkt für **hohe Frequenzen** als **Kurzschluss** und für **niedrige Frequenzen** wie ein **Leerlauf**

2. Spule

Wirkt für **hohe Frequenzen** als **Leerlauf** und für **niedrige Frequenzen** wie ein **Kurzschluss**.

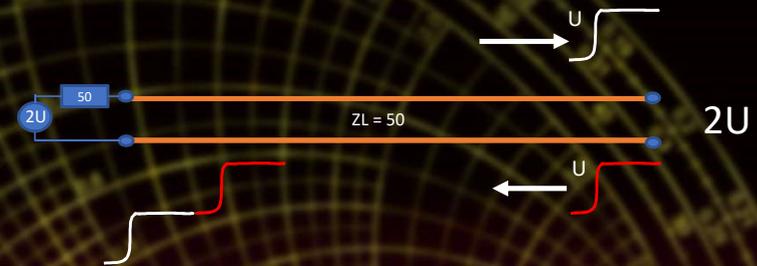


Es ergeben sich **schleichende Flanken**,
die Impedanzen selbst lassen sich nicht mehr gut messen.

REFLEKTION MIT RECHTECK-GENERATOR

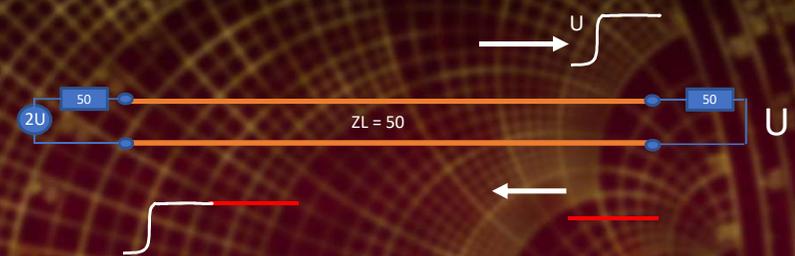
1. Offene Leitung

Totalreflektion am offenen Ende mit **gleichem Vorzeichen**



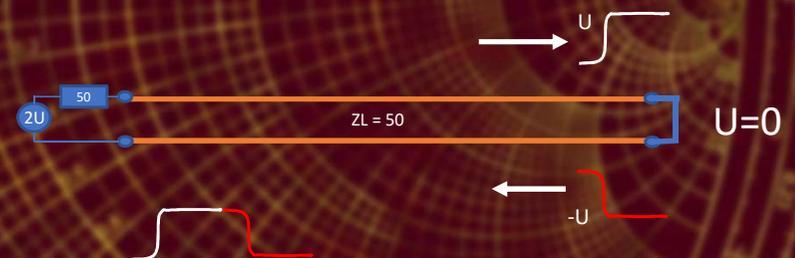
2. Abgeschlossene Leitung

Impuls wird vollständig vom Abschluss **absorbiert**, wenn der Abschlusswiderstand dem Wellenwiderstand der Leitung entspricht.



3. Kurzgeschlossene Leitung

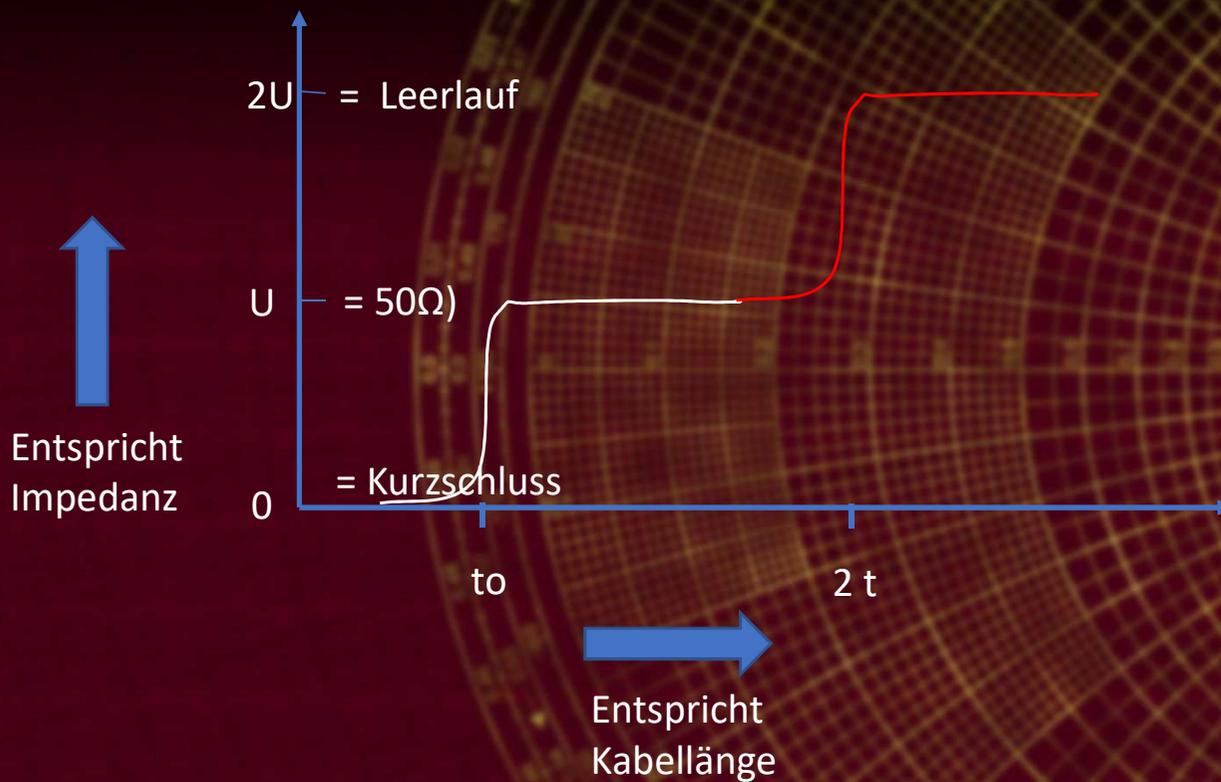
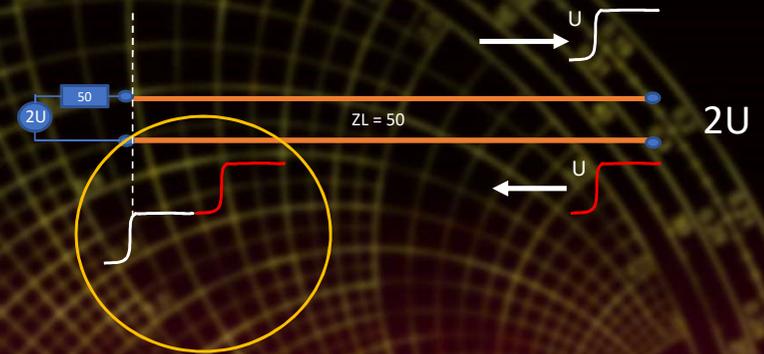
Totalreflektion am offenen Ende mit **umgekehrtem Vorzeichen**



MIT RECHECK-GENERATOR IMPEDANZEN MESSEN

1. Offene Leitung

Totalreflektion am offenen Ende mit gleichem Vorzeichen





TDR GENERATOREN

2 TDR GENERATOR FÜR IMPULS UND RECHTECK

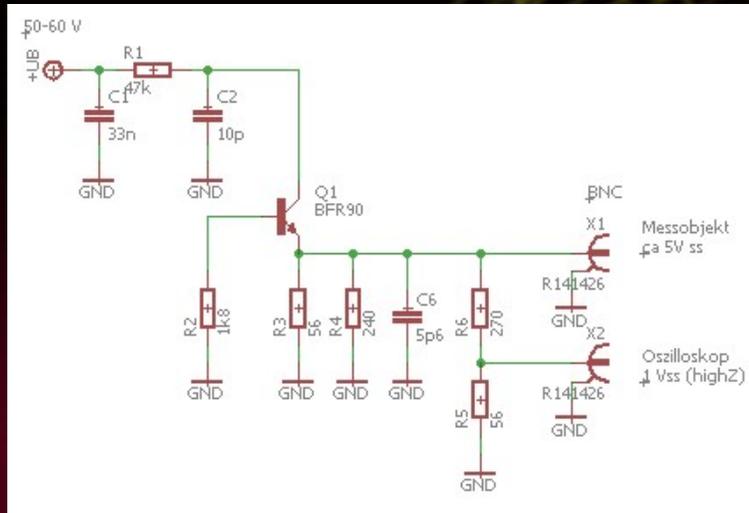


Zum Vorschalten vor das Oszilloskop mit einem 15 V Steckernetzteil.

In Weissblechgehäusen eingebaut mit BNC Steckverbindern und etwas HF gerecht aufgebaut.

...das ist alles...

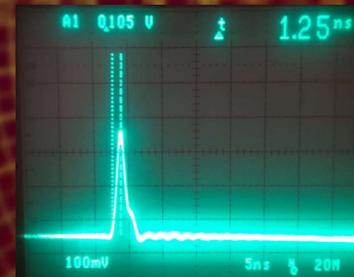
TDR GENERATOR IMPULS



Avalanche Generator

arbeitet also bei einem Vielfachen der zulässigen Betriebsspannung (hier ca 65 V) und erzeugt damit Pulse mit rund **1 ns** Flanken

Das Oszilloskop ist hier über einen 5:1 Teiler angeschlossen

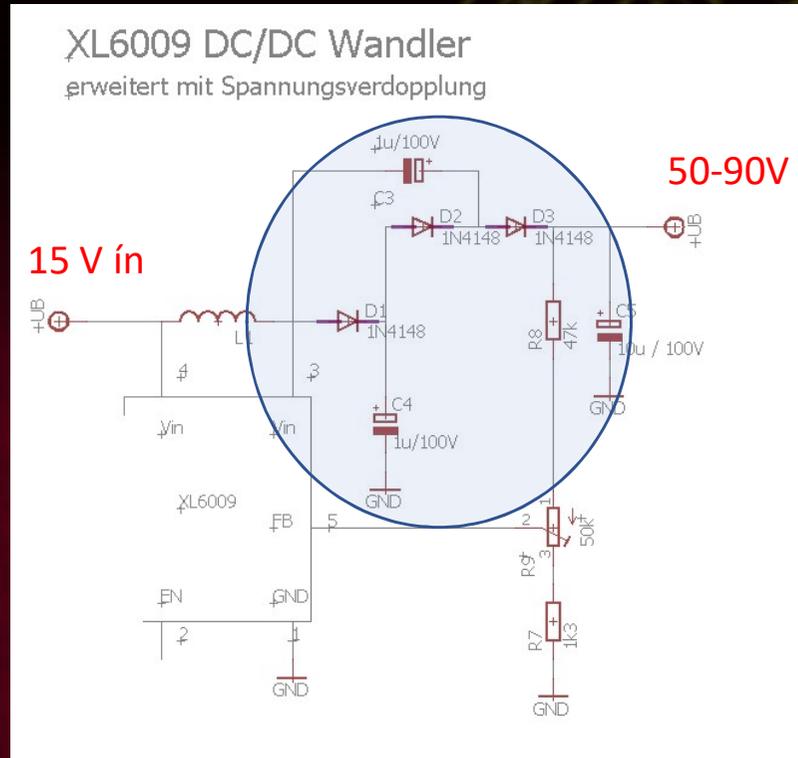


Monitorsignal an 50 Ω
100mV/Div 5ns/Div



HF gerechter Aufbau fliegend auf eine Kupferplatte ohne Leiterbahnen gelötet

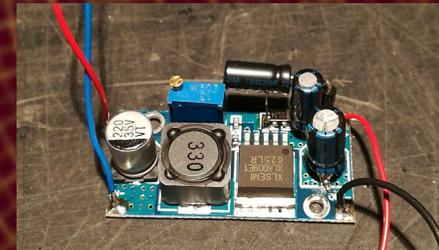
DC/DC WANDLER FÜR IMPULSGENERATOR



DC/DC Wandler mit XL6009 sind bei Ebay für < 5Euro zu erhalten und machen 12 ... 45 V out.

Durch eine Modifizierung als Spannungsverdoppler wird die Ausgangsspannung einstellbar von 50 ... 90 V möglich. Mit der Spannung wird die Wiederholrate der Pulse auf einige KHz eingestellt.

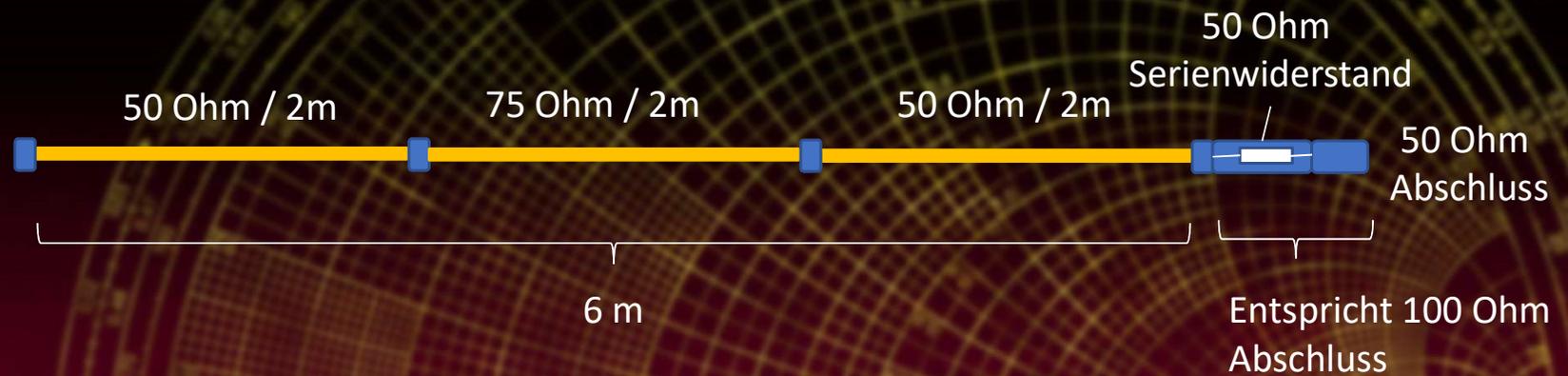
Als Elkos nur 100V Typen verwenden !





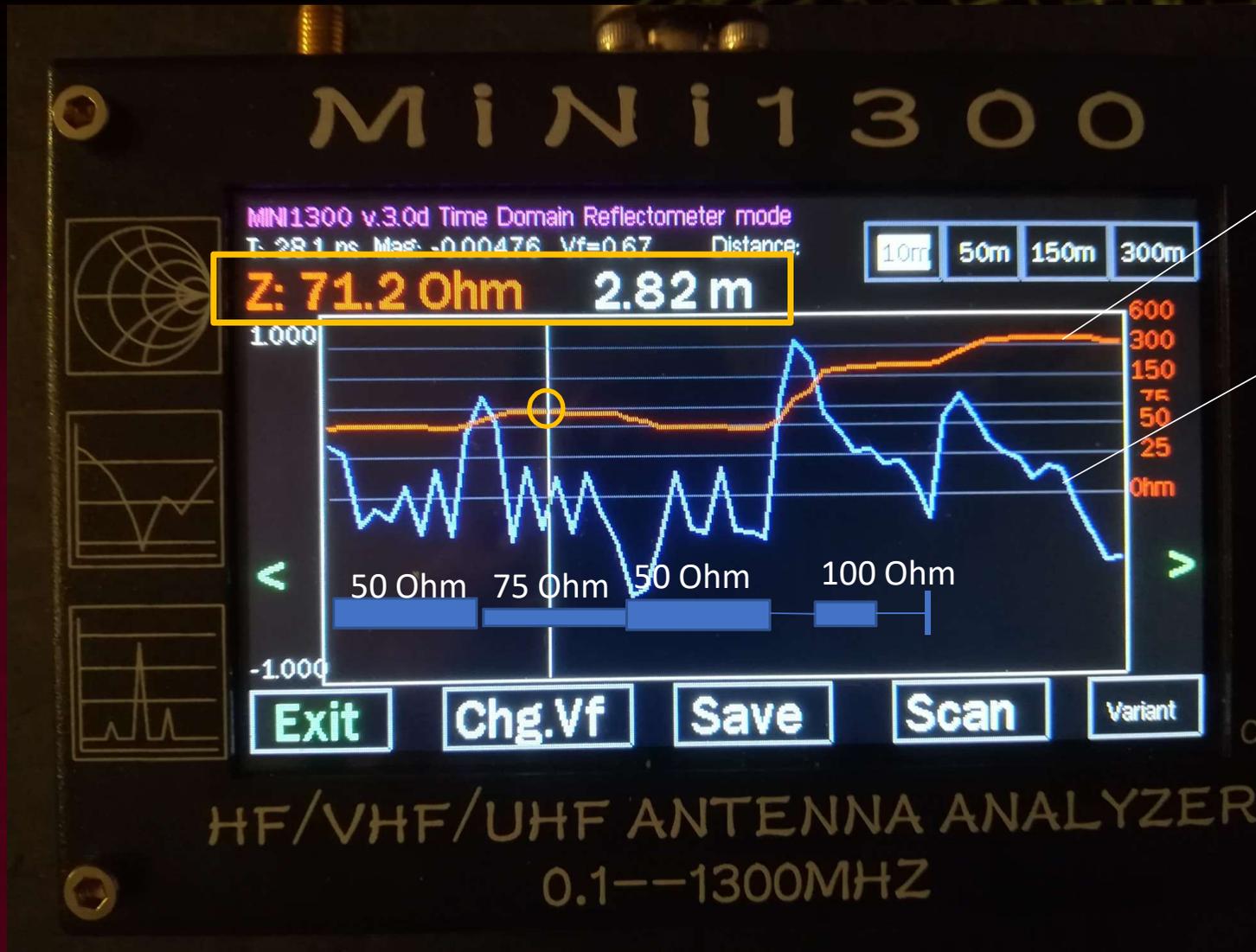
MESSUNGEN

MESSOBJEKT



1. Hier ist versehentlich ein 75 Ohm BNC Kabel anstatt ein 50 Ohm Kabel verwendet worden. Der Fehler soll gesucht werden.
2. Der Abschluss der Leitung ist nicht korrekt. z.B. ein 2:1 Balun anstatt ein 1:1 Balun. Der Fehler soll gesucht werden.

TDR MESSUNG MIT MODERNEN ANTENNENANALYZER (200 €)

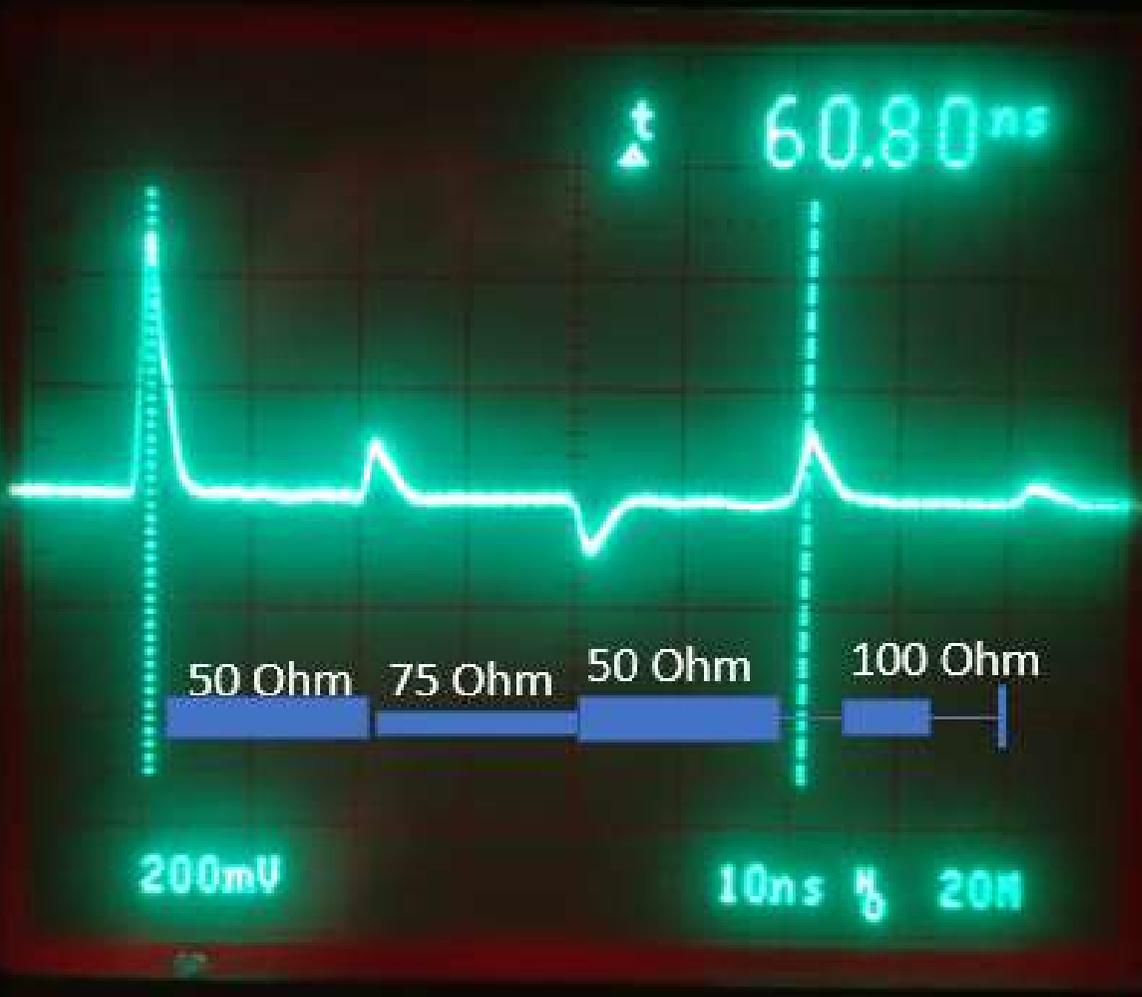


Impedanz (rote Kurve)
75 Ohm Impedanz und
100 Ohm Abschluss können
grob erkannt werden

Reflektionsfaktor (blaue Kurve)
= Impulsantwort
hier relativ ungenau
enthält Messfehler auf den
homogenen 50 / 75 Ohm Stücken.

Nicht besser als eine sehr
grobe Schätzung

TDR MESSUNG MIT IMPULSGENERATOR (EIGENBAU)



Reflektionsfaktor = Impulsantwort

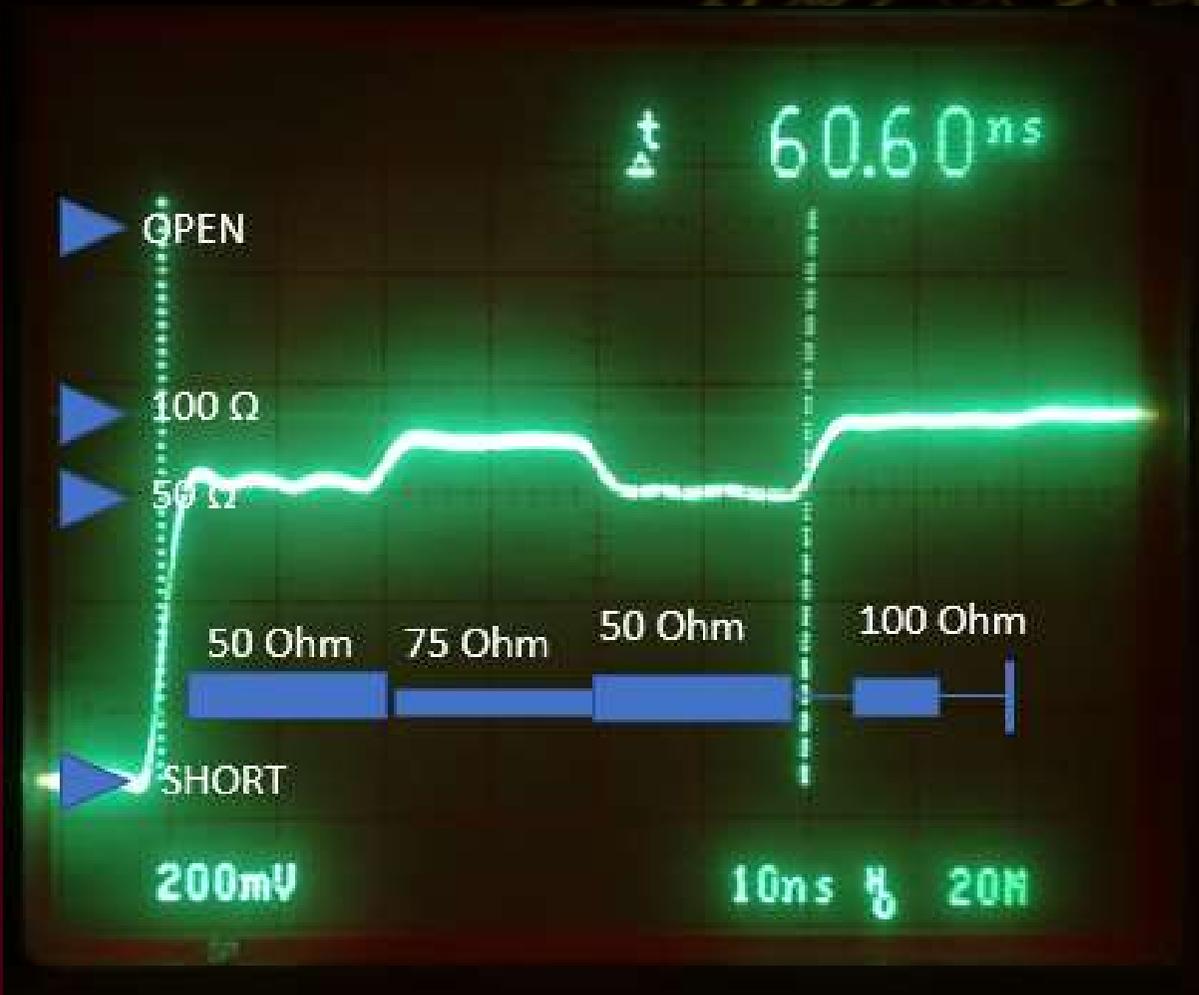
Deutliche Reflektionen an den Übergängen von 50 auf 75 und auf 100 Ohm zu erkennen.

Saubere Linien auf den homogenen Stücken.

Länge von 6 m = 60 ns genau messbar.

Gutes Ergebnis
Höhere Auflösung wäre wünschenswert

TDR MESSUNG MIT RECHTECKGENERATOR (EIGENBAU)



Impedanzmessung

Deutliche Spünge der Impedanz nach 2 / 4 / 6 m zu erkennen.

Länge von 6 m = 60 ns genau messbar.

Gutes Ergebnis
Höhere Auflösung der Impedanzwerte
zwischen 25 .. 100 Ohm wäre wünschenswert

UND ZUM SCHLUSSWORT

Koaxkabel mit zwei Steckern und einem mit schlechtem Kontakt sind vor mir nicht mehr sicher...

Ich finde ihn sofort treffgenau mit TDR Messung !

LITERATUR & LINKS

Impulsrelektometrie (DJ4GC / Funkamateur 10/2017)
(Einführung und Pulsgenerator)

<http://www.fa-pdf.de/>

Application Note 47 Appendix-D, Linear Technologies
(Pulsgenerator)

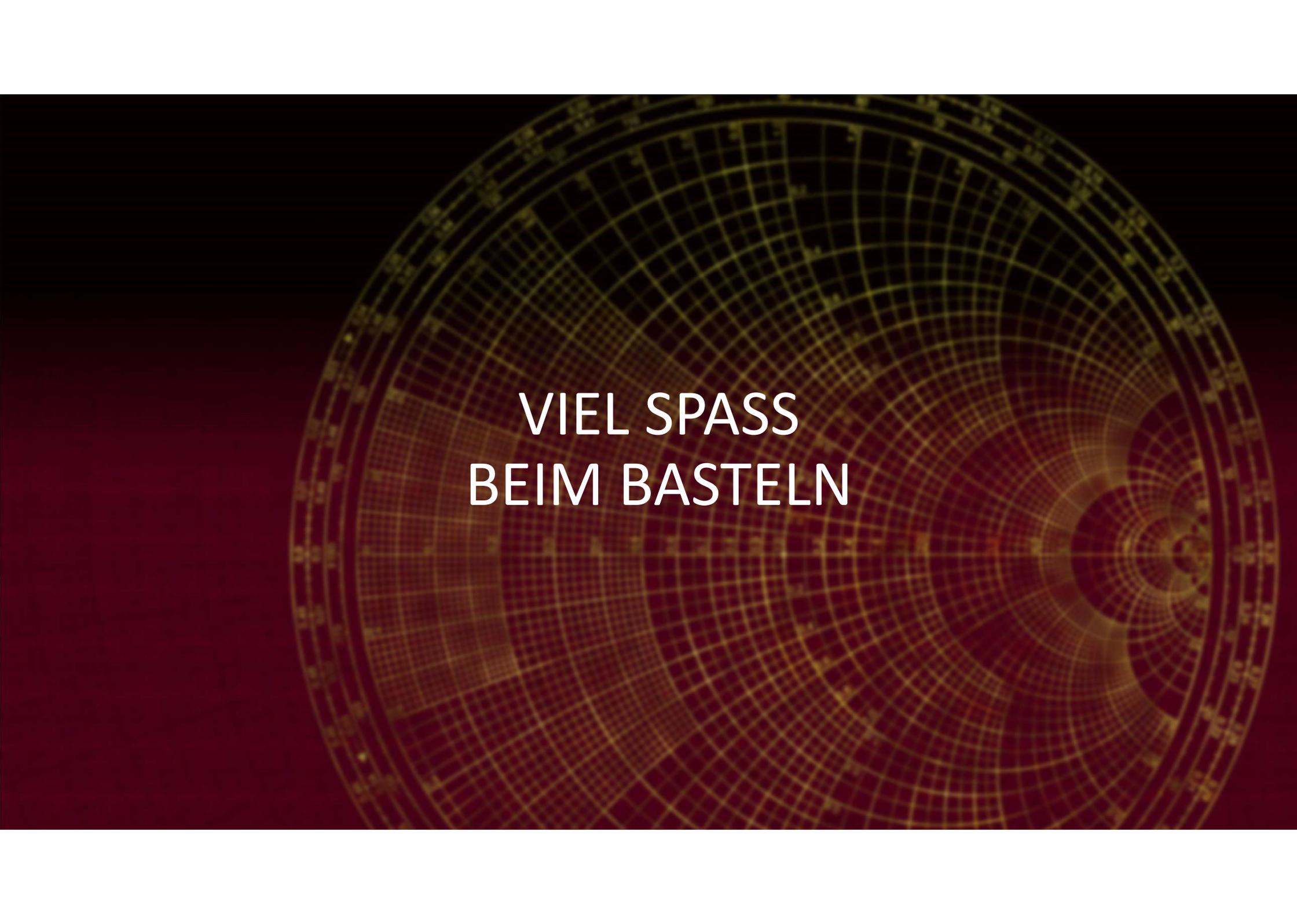
<http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an47fa.pdf>

I9T.net, Impulsgenerator

<http://www.i9t.net/fast-pulse/fast-pulse.html>

Youtube Video, W2AEW
(Rechteckgenerator)

<https://www.youtube.com/watch?v=9cP6w2odGUc>



VIEL SPASS
BEIM BASTELN