

**7M/TDR-1
Nanosekundengenerator
für
Impulsreflektometer (TDR)**

**Aufbau, Bedienungsanleitung
und technische Daten**

Gerätestand 12/97



Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG	3
TECHNISCHE DATEN	3
WIRKUNGSWEISE EINES IMPULSREFLEKTOMETERS	3
ANFORDERUNGEN AN DEN TDR-GENERATOR UND DAS OSZILLOSKOP.....	4
SCHALTUNG, AUFBAU UND ABGLEICH	6
SCHALTUNGSBESCHREIBUNG.....	6
PRAKTISCHER AUFBAU DES TDR-GENERATORS	7
TDR FÜR SYMMETRISCHE SYSTEME (VORSCHLAG).....	7
ABGLEICH UND ÜBERPRÜFUNG DES TDR.....	11
ANWENDUNGEN DES TDR IN DER PRAXIS	13
LAUFZEIT UND FEHLERORTBESTIMMUNG	15
GRENZEN DER ANWENDUNG DES TDR	15
ZUSAMMENFASSUNG	16
LITERATURHINWEISE	16

Abbildungsverzeichnis

BILD 1 ANSCHLUß DES GENERATORS.....	4
BILD 2 BEISPIELE FÜR MEßERGEBNISSE	5
BILD 3 SCHALTUNG DES IMPULSGENERATORS.....	6
BILD 4 AUFBAUZEICHNUNG.....	9
BILD 5 INNENANSICHTEN DES TDR.....	10
BILD 6 GENERATOR MIT SCOPE ,TASTKOPF UND KABEL.....	12
BILD 7 BEISPIELE FÜR MESSUNGEN MIT DEM GENERATOR.....	14

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 TECHNISCHE DATEN.....	3
TABELLE 2 STÜCKLISTE	8

Einleitung

Der Impulsgenerator mit einer sehr geringen Anstiegszeit bildet in Verbindung mit einem breitbandigen Oszilloskop ein Impulsreflektometer und ermöglicht Laufzeitmessungen, die Bestimmung von Fehlanpassungen und Reflexionsstellen in Leitungssystemen und die Untersuchung von Bauelementen. Wegen der Breitbandigkeit der Meßmethode ist ein Impulsreflektometer eine ideale Ergänzung zu einer Impedanzmeßbrücke oder einem SWR-Meter.

Technische Daten

Charakteristik	Daten	Anmerkungen
Signalausgang		
Anstiegs- und Abfallzeit	ca. 1,5ns	An 50 Ohm
Ausgangsimpedanz	50 Ohm	Abhängig vom Abgleich
Ausgangsamplitude	Ca. 1V _{ss}	Leerlauf
	Ca. 0,5V _{ss}	An 50 Ohm
Überschwinger	Max. 10%	Abhängig vom Abgleich
Triggerausgang		
Anstiegs- und Abfallzeit	Ca. 10-15ns	
Ausgangsimpedanz	Ca. 50 Ohm	
Ausgangsamplitude	Ca. 3V _{ss}	Leerlauf
	Ca. 1,5V _{ss}	An 50 Ohm
Tastverhältnis	1:1	Signal- und Triggerausgang
Wiederholfrequenz	1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHz	Ca. +/- 15%
Stromversorgung	8 ... 15VDC	NV-Buchse
	35 ... 50mA	

Tabelle 1 Technische Daten

Wirkungsweise eines Impulsreflektometers

Ein Impulsreflektometer arbeitet breitbandig im Zeitbereich ("time-domain"), im Gegensatz zu Impedanzmeßbrücken, Stehwellenmeßgeräten und Rauschbrücken, bei denen die Messungen und Auswertungen auf bestimmten Frequenzen (=schmalbandig) erfolgen.

Die prinzipielle Wirkungsweise eines Impulsreflektometers (TDR = time domain reflection) ist in /1/ und /2/ beschrieben: Als ein "Leitungsradar" sendet es einen kurzen Impuls in die Leitung und ein Oszilloskop stellt die Echos dar. Üblicherweise werden koaxiale 50Ω-Systeme verwendet; an Stellen, wo es zu Fehlanpassungen kommt (Relaiskontakte, Schalter, etc.) wird ein Teil der Energie des Impulses reflektiert und erscheint nach der doppelten Laufzeit wieder am TDR-Generator. Aus der Art und Lage der Echos kann auf die Stoßstelle geschlossen werden; nur bei idealer und breitbandiger Anpassung treten keine Echos auf. In Bild 1 ist die Meßanordnung mit dem TDR und in Bild 2 sind einige Beispiele mit den Grundlagen dargestellt. Beispiele aus der Praxis können in /3/, /4/ und /5/ nachgelesen werden.

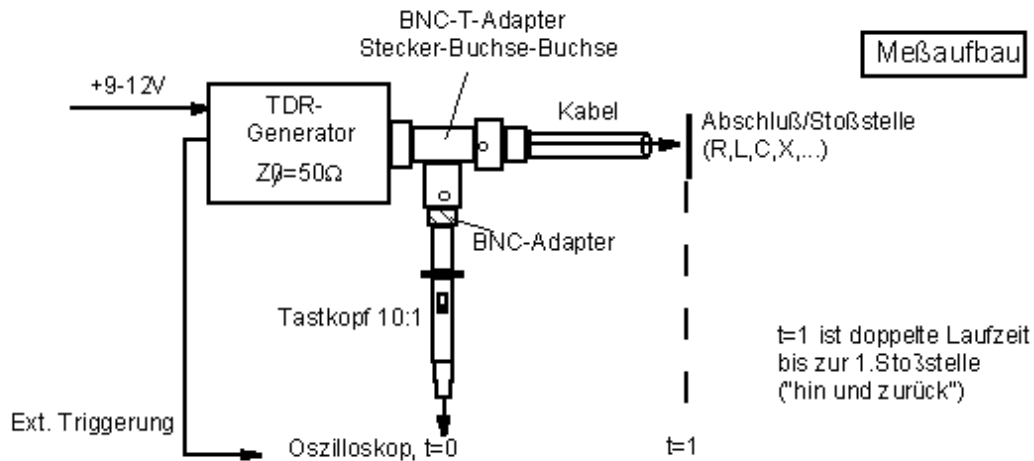


Bild 1 Anschluß des Generators

Anforderungen an den TDR-Generator und das Oszilloskop

- Wegen der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit in Leitungen von ca. 0,2 - 0,25 m/ns (Lichtgeschwindigkeit x Verkürzungsfaktor der Leitung), muß der Impuls und das angeschlossene Oszilloskop eine sehr geringe Anstiegszeit haben. Bei einer gewünschten Auflösung von z.B. einem Meter ist eine Anstiegszeit von ca. 5ns erforderlich - das entspricht nach der bekannten Formel $B = \frac{300}{\lambda}$ einer Bandbreite von 60MHz. Um Fehlanpassungen bis in den VHF-Bereich zu erfassen sind Bandbreiten von über 100MHz mit Anstiegszeiten von unter 3ns für den TDR-Generator und das Oszilloskop notwendig.
- Das Überschwingen des Generatorausgangssignales soll möglichst gering sein (< 10%).
- Der Generatorinnenwiderstand (Z₀) muß möglichst genau 50Ω (reell) betragen.
- Wegen des sehr geringen auswertbaren Zeitbereiches ist - insbesondere für eine ausreichende Bildhelligkeit bei analogen Oszilloskopen - eine hohe Bildwiederholfrequenz bis zu 1MHz erforderlich. Für die Betrachtung von Vorgängen mit größeren Eigenzeiten (Umladevorgänge von L's und C's) muß die Bildwiederholfrequenz stufenweise auf 1kHz reduzierbar sein.
- Das Tastverhältnis sollte ungefähr 1:1 sein, damit für den positiven und negativen Impuls die gleiche Ein- und Ausschwingzeit zur Verfügung steht und mit der maximalen Wiederholfrequenz gearbeitet werden kann.
- Zur Vermeidung von Zerstörungen z.B. bei Antennenvorverstärkern soll die Ausgangsspannung nicht mehr als 1VSS im Leerlauf betragen. Eine genaue Ausgangsspannung ist i.A. nicht notwendig, weil nur im Zeitbereich gemessen wird oder Spannungsverhältnisse bestimmt werden.
- Ein unabhängiger Triggerausgang mit einem Tastverhältnis von 1:1 erleichtert die Darstellung eines stehenden Bildes, unabhängig von der durch das Echo entstehenden Impulsform und Impulsamplitude am Generatorausgang.

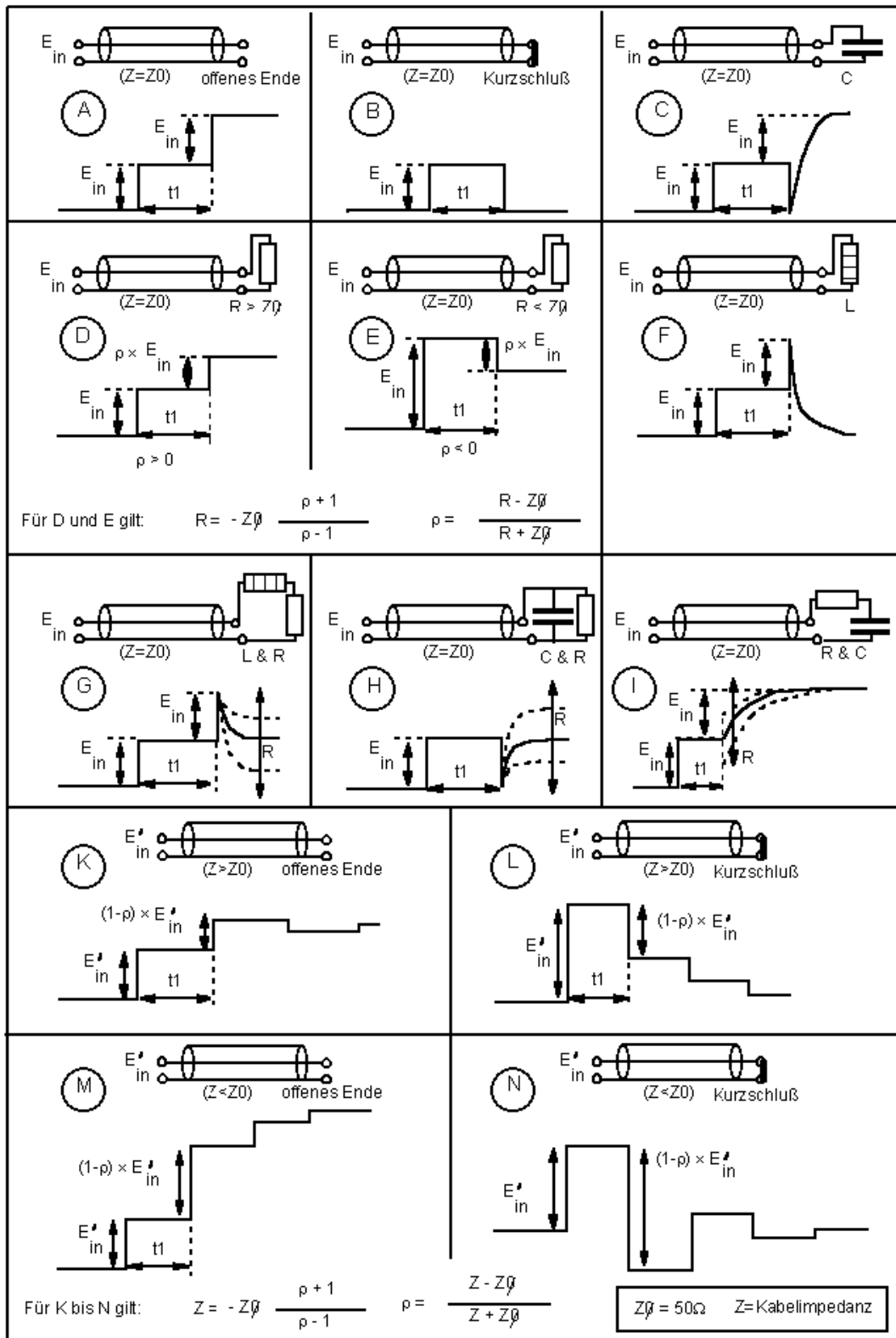


Bild 2 Beispiele für Meßergebnisse

Schaltung, Aufbau und Abgleich

Schaltungsbeschreibung

Diese Daten können einfach und preiswert mit einem Standard-IC Typ 74AS00 in Advanced Schottky-Technik erreicht werden (Bild 3).

Hinweis:

Low Power-Typen dieses IC's (LS, ALS u.a.) sind wegen der größeren Anstiegszeiten bis über 10ns unbrauchbar. Es muß Advanced-Schottky-Technik ("AS") sein!

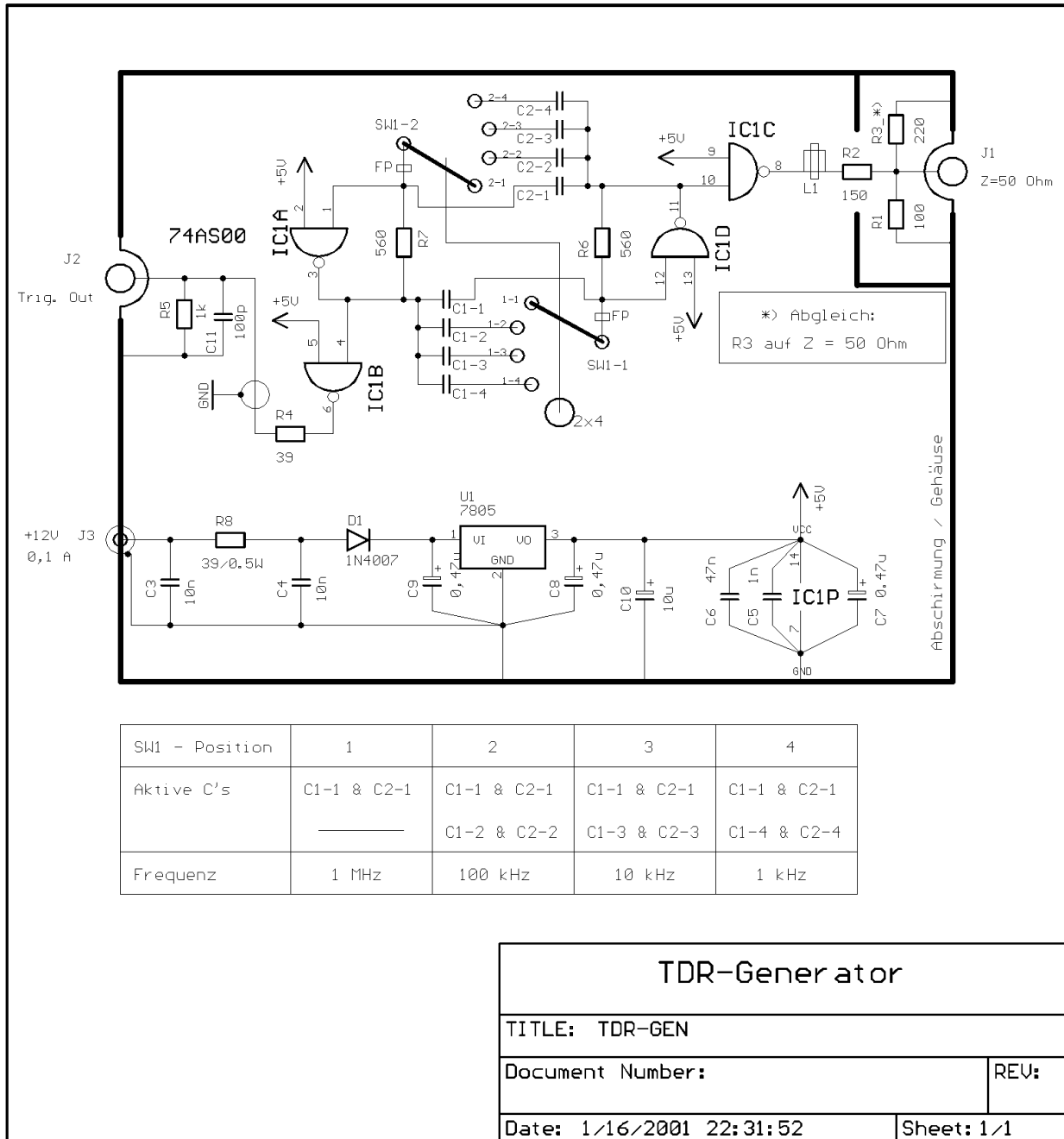


Bild 3 Schaltung des Impulsgenerators

Die Gatter 1A und 1D arbeiten als Gegentaktoszillator mit einstellbarer Frequenz und liefern, im Gegensatz zu dem sonst üblichen "TTL-Multivibrator", ein Tastverhältnis von 1:1. Zur Vermeidung parasitärer Schwingungen im MHz-Bereich sind die Kondensatoren C1-1 und C2-1 fest angeschlossen und nicht über den Frequenzwahlschalter geführt, zusätzlich empfehlen sich zwei Ferritperlen. Gatter 1C stellt die Impulsformerstufe dar und erreicht eine Anstiegszeit von ca. 1ns. Der Innenwiderstand des IC1 am Pin 8 beträgt ca. 30Ω , über die Widerstandskombination R1, R2 und R3 erfolgt die Anpassung auf 50Ω am Ausgang und ca. 1VSS Leerlaufspannung. Eine Abschirmung des Ausganges verhindert eine kapazitive Kopplung ("Bypass") direkt zum Ausgang. Durch eine geringe Änderung von R3 kann auf exakt 50Ω angepasst werden, L1 verringert mögliche Überschwinger im Ausgangssignal und muß experimentell ermittelt werden. Gatter 1B liefert das Triggersignal, R5 und C11 "runden" es etwas ab und ermöglichen wegen der Vermeidung von Überschwingern auch im Trigger-Automatikmodus vieler Oszilloskope ein stehendes und jitterfreies Bild. Schaltungsbedingt ist das Triggersignal im Gegentakt zum Ausgangssignal, was aber in der Praxis keine Rolle spielt.

Die Stromversorgung erfolgt über einen Standard-Regler mit +5V, der mit C8-C10 abgeblockt wird. Direkt am Versorgungs-Pin von IC1 sind C5-C7 induktionsarm angelötet. Der externe 12VDC-Anschluß ist beim Mustergerät über eine Niedervoltbuchse geführt.

Praktischer Aufbau des TDR-Generators

Wegen des kompakten Aufbaus und der wenigen Bauelemente ist keine Platine erforderlich. Der Aufbau erfolgt HF-gerecht in freier Bauweise auf einer verzinnten Grundplatte und mit kürzester Leitungsführung insbesondere im Ausgangsbereich (Bild 4). Das IC wird durch den Masseanschluß an Pin 7 und die Abblockkondensatoren C5-C7 an Pin 14 gehalten, die restlichen Pins werden kurz abgezwickt und direkt verdrahtet. Wegen der leichteren Montage ist die Ausgangsbuchse J1 direkt mit der Grundplatte verlötet und von Hinten in das Gehäuse eingeschraubt (Detailskizze in Bild 4).

Bei den Mustergeräten des Verfassers hat sich zusätzlich eine Dämpfung des Ausgangsbereiches mit leitfähigem Schaumstoff bewährt, der die Überschwinger zusätzlich zu L1 weiter reduziert hat ohne die Anstiegszeit spürbar zu vergrößern. Mit kleinen Stücken des leitfähigen Schaumstoffs wird der Raum gefüllt und mit Isolierband verschlossen.

Bild 5 zeigt eine Innenaufnahme des aufgebauten TDR-Generators.

TDR für symmetrische Systeme (Vorschlag)

Es ist möglich, den TDR-Generator für ein symmetrisches System - z.B. 240Ω - aufzubauen. Dafür werden zwei Gegentaktausgänge benötigt, die einen Innenwiderstand von je 120Ω gegen Erdpotential haben. Sie können durch die Gatter IC1C und IC1B (Bild 3) gebildet werden - unter Verlust des Triggerausganges. Zur Auswertung wird dann ein Oszilloskop mit Differenzeingang oder zwei subtrahierenden Kanälen benötigt. Der Verfasser hat diese Variante nicht aufgebaut, daher liegen keine Erfahrungen vor.

R1	100 Ohm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	
R2	150 Ohm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	
R3	220 Ohm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	(siehe Text)
R4	39 Ohm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	
R5	1 kOhm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	
R6	560 Ohm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	
R7	560 Ohm	0,25W (Metallfilm ungewendelt)	
R8	39 Ohm	0,5W (Kohleschicht oder Metallfilm)	
C1-1	1nF	Keramik	
C1-2	10nF	Keramik	
C1-3	100nF	Keramik oder Kunststoff	
C1-4	1uF	Kunststoff	
C2-1	1nF	Keramik	
C2-2	10nF	Keramik	
C2-3	100nF	Keramik oder Kunststoff	
C2-4	1uF	Kunststoff	
C3	10nF	Keramik	
C4	10nF	Keramik	
C5	1nF	Keramik	
C6	47nF	Keramik	
C7	0,47uF/16V	Tantal	
C8	0,47uF/16V	Tantal	
C9	0,47uF/16V	Tantal	
C10	10uF/16V	Elko	
C11	100pF	Keramik	
IC1	74AS00	(nicht 74ALS00 oder 74LS00!)	
U1	78L05		
D1	1N4007		
L1	2-3 Wdg. auf Doppellochkern (siehe Text)		
SW1	2x4 (z.B. Marquardt Typ 9032 mit passendem Knopf)		
J1	BNC-Flanschbuchse 50 Ohm		
J2	BNC-Flanschbuchse 50 Ohm		
J3	NV-Buchse		
	Alu-Gehäuse 100mm x 55mm x 55mm (LxBxH)		
	Verzinntes Stahlblech ca. 50mm x 25mm (Montageplatte)		
	Verzinntes Stahlblech ca. 30mm x 25mm (Abschirmung)		
	Abgewinkeltes Alublech für Drehschalter-Befestigung (SW 1)		
	2 Ferritperlen (siehe Text)		

Tabelle 2 Stückliste

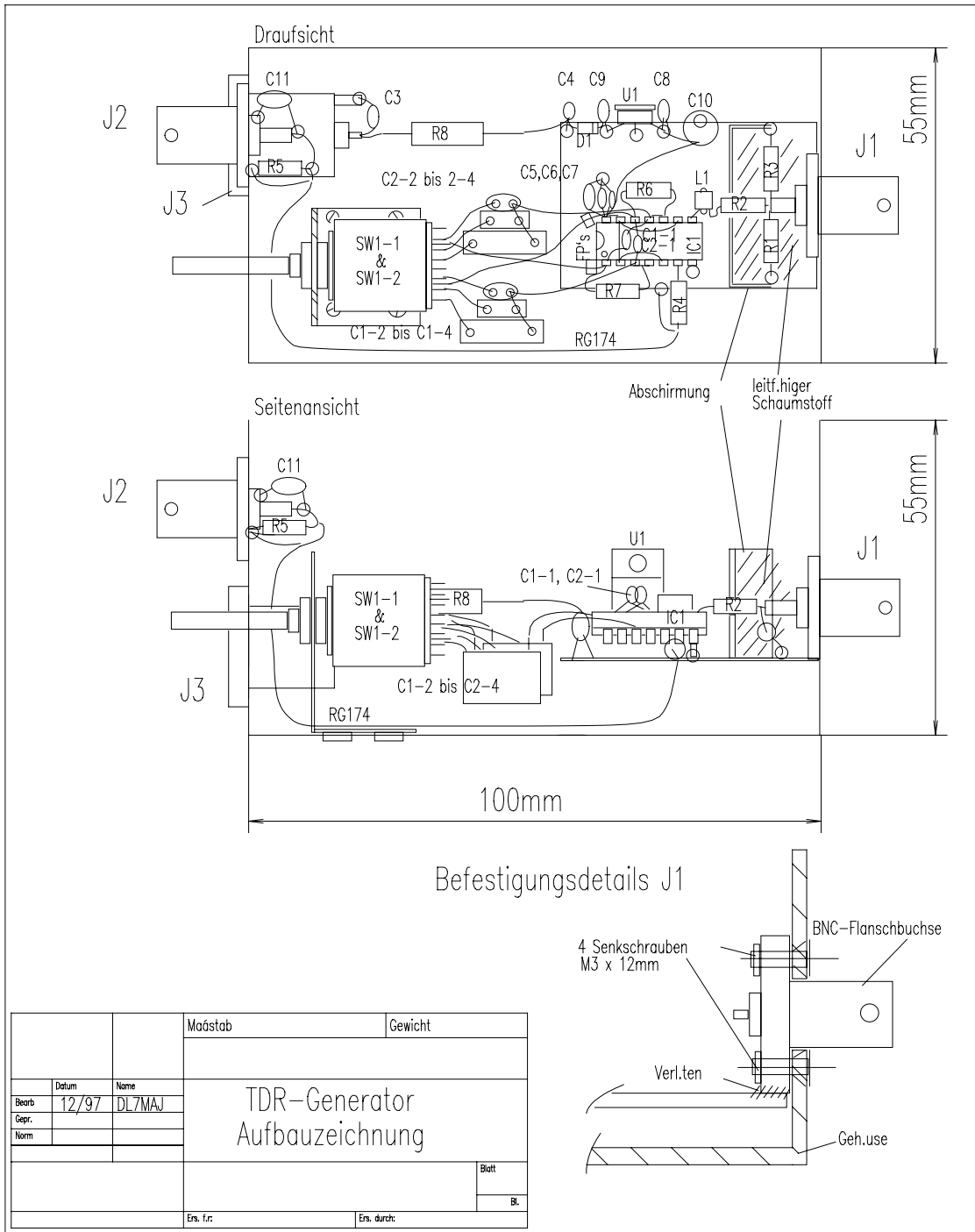


Bild 4 Aufbauzeichnung

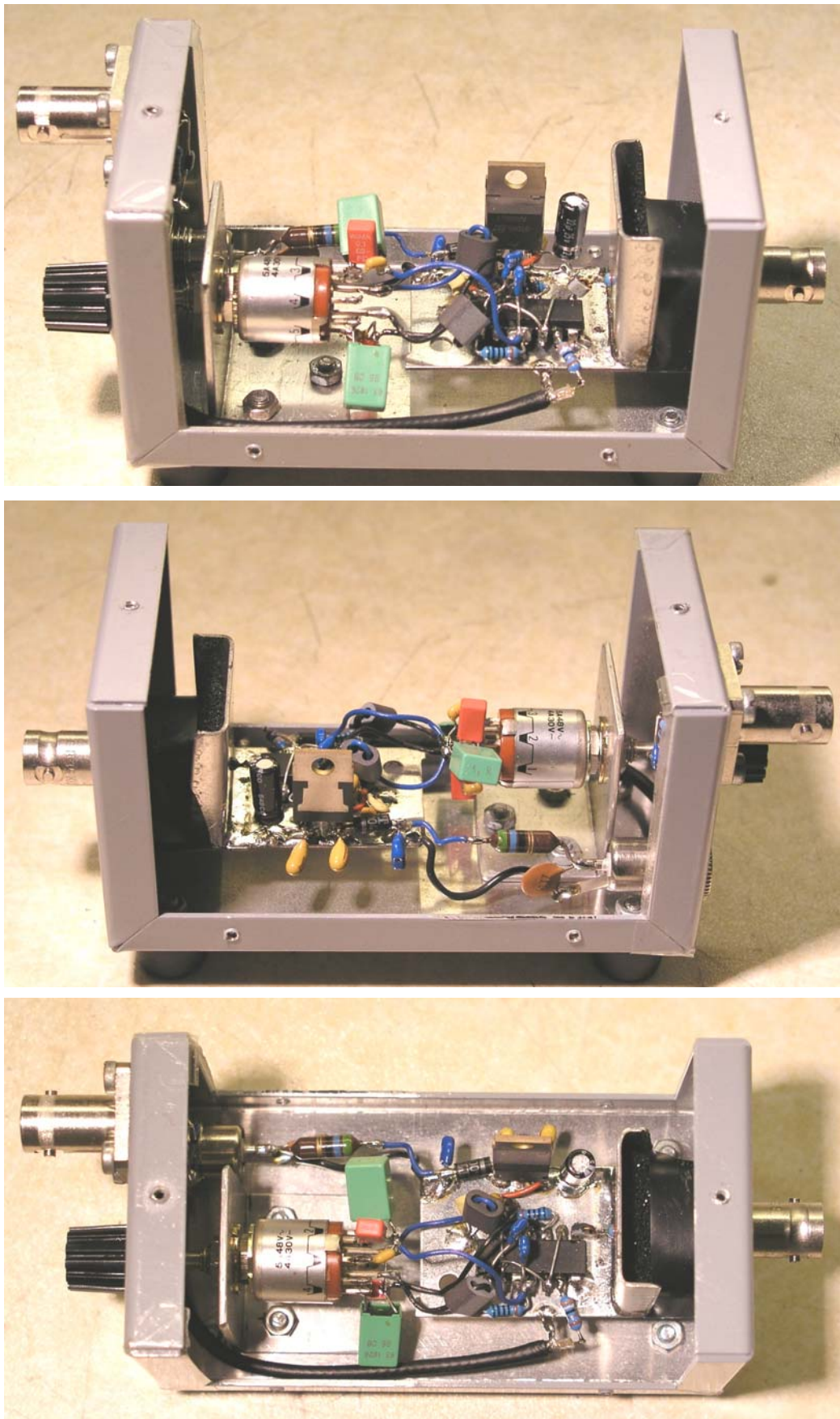


Bild 5 Innenansichten des TDR

Abgleich und Überprüfung des TDR

Benötigte Meßgeräte:

- Oszilloskop mit 10:1 Tastkopf < 5pF, mindestens 100MHz Bandbreite ($t_{AN} < 3ns$).
- Abschlußwiderstand 50 Ω , 1GHz

TDR-Generator an 12VDC anschliessen, die Stromaufnahme sollte ca. 35-50mA sein.
Interne Betriebsspannung (+5VDC) an Pin 14 von IC1 messen.

1. Messung des Generatorinnenwiderstandes

Leerlaufspannung an der Ausgangsbuchse J1 messen (ca. 1,0VSS), dann den Ausgang mit exakt 50 Ω belasten. Die Spannung muß auf die halbe Leerlaufspannung absinken. Falls die Abweichung zu groß ist, muß R3 etwas verändert werden. Sinkt die Ausgangsspannung bei Belastung mit 50 Ω auf weniger als die Hälfte ab, so ist der Generatorinnenwiderstand größer als 50 Ω und R3 muß etwas verkleinert werden (oder umgekehrt). Dabei ändert sich natürlich auch die Leerlaufspannung etwas, so daß die Messungen wiederholt werden müssen - wichtig ist hier jedoch nur der Innenwiderstand.

Bei größeren Abweichungen kann auch R2 geändert werden. Dabei ist zu beachten, daß die Belastung des IC1 an Pin 8 200-250 Ω betragen muß, da bei dieser Last die Rechteckform des Ausgangssignals optimal ist.

2. Messung der Wiederholfrequenzen und des Tastverhältnisses

Oszilloskop mit 50 Ω -Abschluß am Ausgang anschliessen und bei den Schalterstellungen 1MHz, 100kHz, 10kHz und 1kHz die Frequenz und das Tastverhältnis (1:1) bestimmen, Toleranzen von +/- 15% sind zulässig.

3. Messung der Anstiegszeit und der Überschwinger

Mit dem Oszilloskop die Ausgangskurvenform mit einem abgeglichenen Tastkopf und einem 50 Ω -Abschlußwiderstand messen, die Anstiegszeit sollte ca. 1,5ns betragen. Bei der Messung der Anstiegszeit wird jedoch meistens die Eigenzeit des Oszilloskops gemessen, da der TDR-Generator mit 1ns i.d.R. schneller ist!

L1 versuchsweise für eine optimale Kurvenform (minimale Überschwinger) dimensionieren.

4. Messung des Triggerausganges

Prüfen, ob ca. 3VSS (Leerlauf) und 1,5VSS (an 50 Ω) geliefert werden, die Anstiegszeit liegt bei ca. 10-15ns; es dürfen keine Überschwinger auftreten.

Damit ist der Abgleich beendet.

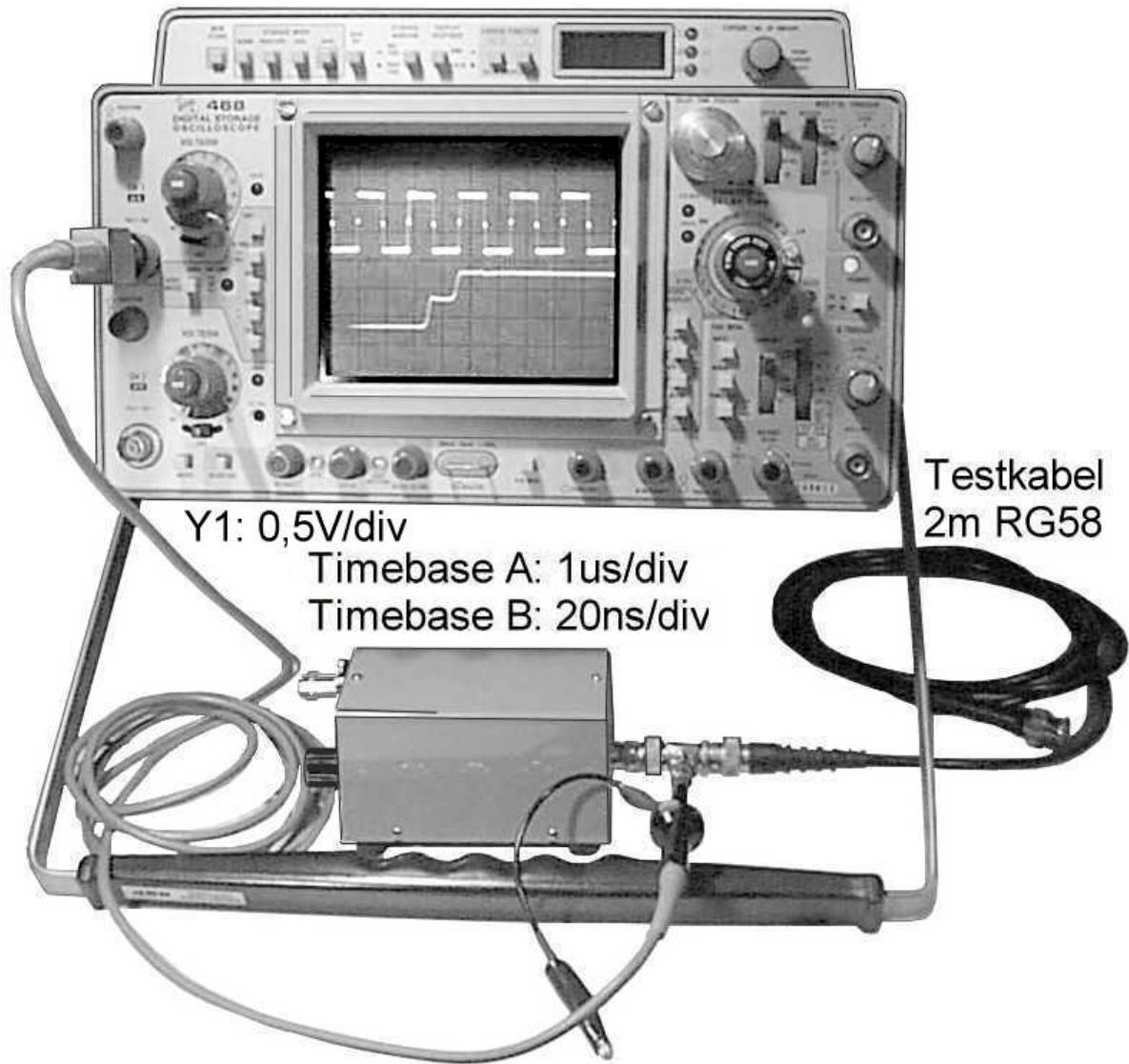


Bild 6 Generator mit Scope ,Tastkopf und Kabel

Anwendungen des TDR in der Praxis

Bild 6 zeigt den fertigen TDR-Generator mit angeschlossenem Tastkopf, 2m Koaxkabel als Meßobjekt und dem Oszilloskop (Tektronix Typ 468, B=100MHz) . Die Zeitbasis A ist auf $1\mu\text{s}/\text{div}$ eingestellt, die Impulsfrequenz ist 1MHz. Die Zeitbasis B ist auf $20\text{ns}/\text{div}$ eingestellt, die Impulslaufzeit beträgt 20ns. Aus der Impulslaufzeit von 20ns (Timebase B) ergibt sich nach Formel 2 (Seite 14) eine Kabellänge von 2m. Das Ergebnis entspricht Bild2(A).

Tip: Der Anschluß des Tastkopfes ist mit einen BNC-T-Stück (Stecker-Buchse-Buchse) und einem BNC-Adapter für Tastköpfe, die diesen als Standardzubehör beiliegen, am einfachsten.

Bei allen Messungen sollte die Bildwiederholfrequenz schrittweise auf 1kHz reduziert werden. Damit kann überprüft werden, ob Komponenten mit "Langzeitwirkung" (L/C oder R/C) im Meßkreis sind!

Der Verfasser hat an seinen Antennen und einigen Bauelementen Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Bild 7 gezeigt werden. Die Messungen erfolgten mit einem digitalen Oszilloskop, Bandbreite 100MHz und 20MHz umschaltbar), Abtastrate max. 2GHz.

Die meisten Oszillogramme sind bei Vergleich mit Bild 2 nachvollziehbar; es sollen daher nur die Besonderheiten erklärt werden:

Fall A: Spule mit Kabel; aus der Zeitkonstanten von ca. 15ns folgt eine Induktivität von ca. 0,75mH ($L = 50\Omega \times 15\text{ns} = 750\text{ nH}$). Es waren einige Windungen auf einem Ferritkern.

Fall B: Kondensator direkt am TDR, die Anschlußdrähte machen sich bemerkbar. Die Kapazität (1nF) ergibt eine Zeitkonstante von ca. 50nS

Fall C/D: Eine KW-Vertikalantenne (10m-80m) wirkt für das TDR wie eine Kapazität, eine Eigenschwingung mit $T=140\text{ns}$ (ca. 7MHz) ist zu erkennen. Die Reduzierung der Meßbandbreite auf 20MHz hat auch die Einstreuungen durch Rundfunksender vermindert (D).

Fall E/F/G: Der 2m-Vorverstärker wird im ausgeschalteten Zustand durch eine geringe Reflexion sichtbar (E). Die Antenne selbst ist eine X-Quad mit zirkularer Polarisierung, die sich hier als Induktivität verhält. Bei eingeschaltetem VV wird nur der Koppelkondensator (27pF) im Vorverstärkerausgang sichtbar (F). Die Reduzierung der Bandbreite lässt die Stoßstelle durch den VV fast "verschwinden" (G).

Fall H: Der TDR im "Leerlauf". Diese Messung dient als Referenz für die Fälle I bis M.

Fall I/K: Ein 75Ω -Koaxialkabel (altes Fernsehkabel) ist direkt am TDR angeschlossen. Über die Leerlaufspannung (aus H) und dem Innenwiderstand $Z_0=50\Omega$ des TDR können die auftretenden Spannungen nachgerechnet werden (entspr. Bild 2, Fall K/L)

Fall L/M: Wie I/K, aber mit einem 25Ω -Koaxkabel, das durch zwei parallele 50Ω -Kabel nachgebildet wurde (entspr. Bild 2, Fall M/N).

Fall N/O/P: Die unterschiedlichen Verluste der Kabel sind erkennbar.

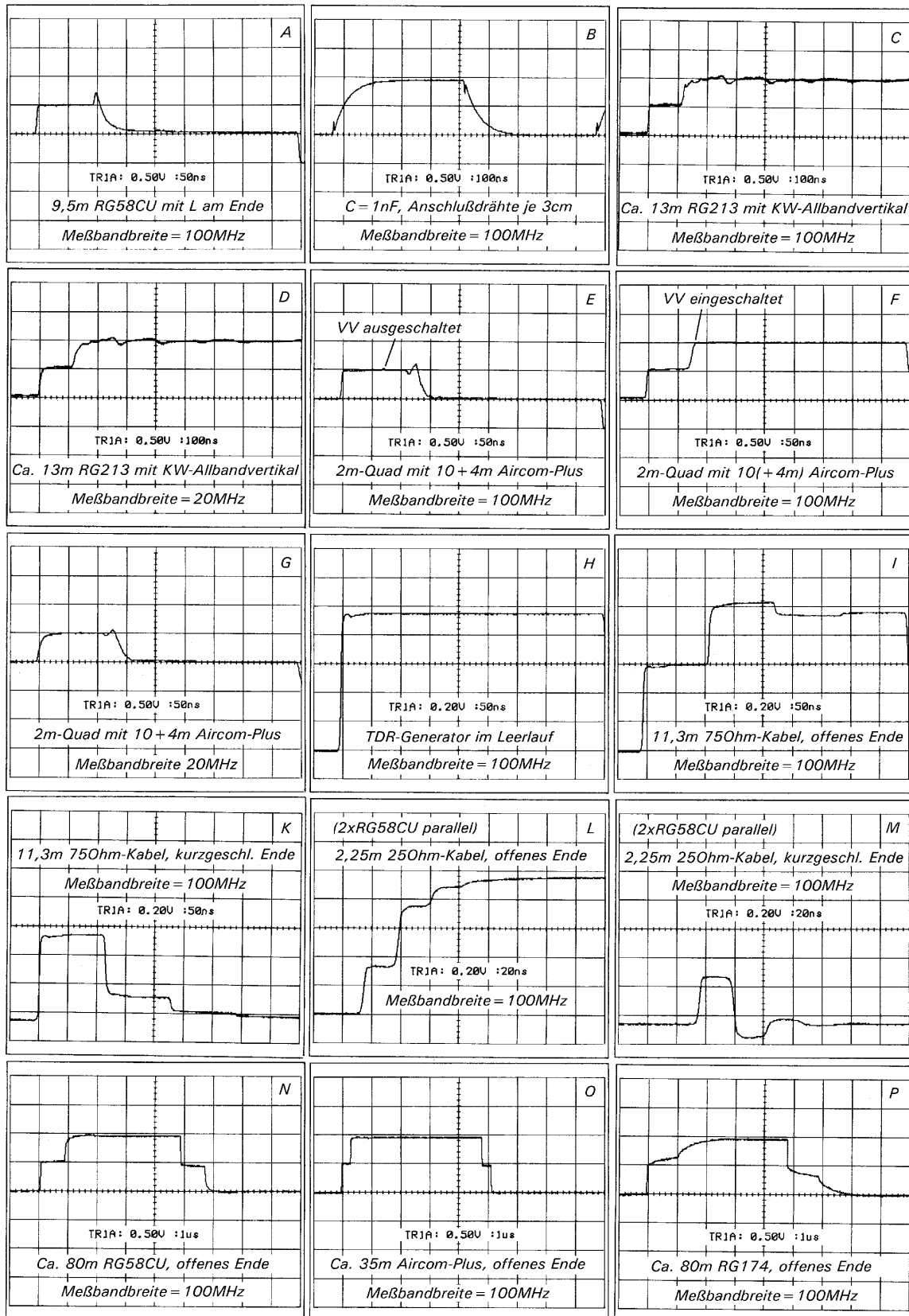


Bild 7 Beispiele für Messungen mit dem Generator

Laufzeit und Fehlerortbestimmung

Bei allen Längenbestimmungen muß der Verkürzungsfaktor der Leitung berücksichtigt werden:

- v = 0,66 für PE-Isolation (voll)
- v = 0,78..0,89 für PE-Isolation (geschäumt)
- v = 0,87..0,96 für Luftraumisolation
- v = 0,71 für Teflon (PTFE)

Der Reflexionsort berechnet sich nach Formel 1:

$$d = \frac{t \times v \times c_0}{2}$$

- d = Abstand zur Reflexionsstelle
- v = Verkürzungsfaktor
- t = Zeit bis zum Echo (am Oszilloskop direkt abgelesen = doppelte Laufzeit = "2" im Nenner)
- c₀ = Lichtgeschwindigkeit (300.000km/s = 0,3m/ns)

Vereinfachte Formel 2: $d = t \times v \times 0,15$

d in Meter, t in ns

Beispiel in Bild 6: Bei einem Koaxkabel RG58 erscheint das Echo nach 20ns Laufzeit.
Ergebnis: Mit v = 0,66 ergibt sich d = 2m.

Grenzen der Anwendung des TDR

- Die Bandbreite und Anstiegszeit des Oszilloskops bestimmt die Auflösung (frequenzmäßig und räumlich). Mit einem 10MHz-Oszilloskop kann die Eignung eines VHF-Koaxialrelais für 145MHz nicht bestimmt werden.
- Eine schmalbandige Anpassung - z.B. von Antennen oder Tunern - kann NICHT gemessen werden, weil ein TDR grundsätzlich breitbandig arbeitet und in diesen Fällen immer eine "Fehlanpassung" anzeigt!
- Treten in einem System an verschiedenen Stoßstellen Echos auf, die sich überlagern, so ist eine Auswertung schwierig oder gar unmöglich, weil die Echos auf dem Rückweg auch wieder reflektiert werden und abermals Echos verursachen (=Mehrfachechos). Das gemessene System muß also im Prinzip bekannt sein, um die Reflexionen richtig interpretieren zu können.

Zusammenfassung

Das Impulsreflektometer (TDR) vereinfacht in vielen Fällen die Fehlersuche in Leitungssystemen und ermöglicht eine schnelle Untersuchung der breitbandigen HF-Eigenschaften von Bauteilen. Es stellt eine gute Ergänzung zu einer Impedanzmeßbrücke dar -aber keinen Ersatz dafür! Die Qualität der Messung hängt (leider) vom verwendeten Oszilloskop ab. 10MHz Bandbreite sind das Minimum, es sollten schon - je nach Anwendung - 50MHz sein!

Literaturhinweise

- /1/ Taschenbuch der Hochfrequenztechnik Meinke-Gundlach, 5.Auflage Kapitel I, Seite 36
- /2/ ARRL Antennahandbook 17.Auflage Kapitel 27, Seite 31: TDR-Generator
- /3/ CQ/DL 4/82 S.182 G.Schwarzbeck, DL1BU: Messungen an Koaxialrelais und Antennenschaltern
- /4/ UKW-Berichte 2/85 S.108 E.Stadler, DG7GK: Messung des Wellenwiderstandes von Kabeln mit Impulsen und Sinuswellen
- /5/ UKW-Berichte 2/86 S.88 E.Stadler DG7GK: Reflexionsfaktor

Stefan Steger, DL7MAJ, Gulbranssonstr. 20, D-81477 München Tel.: 089/7900920

e-Mail: stefan.steger@t-online.de

Homepage: www.dl7maj.de

Eine persönliche Anmerkung:

Dieses Projekt ist in meiner Freizeit entstanden und wird auch in meiner Freizeit weiter entwickelt. Aus diesem Grund kann ich Interessenten nur eine eingeschränkte Unterstützung anbieten.