

## Building Version 2 of an S-Parameter Test Set for the VNWA-3E

Erstellen von Version 2 eines S-Parameter-Test-Sets für den VNWA-3E

Whitham D. Reeve, Anchorage, Alaska USA (© 2017 W. Reeve)

### 1. Einführung

Im Herbst 2013 schrieb ich über ein im Geschäft hergestelltes S-Parameter-Test-Set für den VNWA-3E-Vektornetzwerkanalysator {ReeveSPTS}. Der Testsatz (im Folgenden als Version 1 oder V1 bezeichnet) ermöglicht automatische bidirektionale S-Parameter-Messungen und beseitigt die Unannehmlichkeit, die Eingangs- und Ausgangskabel auszutauschen, wenn Messungen an einem 2-Port-Gerät wie einem Filter oder Verstärker durchgeführt werden. Das V1-Test-Set lief sehr gut, aber ich entschied mich für eine Version, die elektronisch einfacher und mechanisch bequemer zu bedienen ist. Der resultierende Testsatz der Version 2 wird in diesem Dokument beschrieben (Abbildung 1).

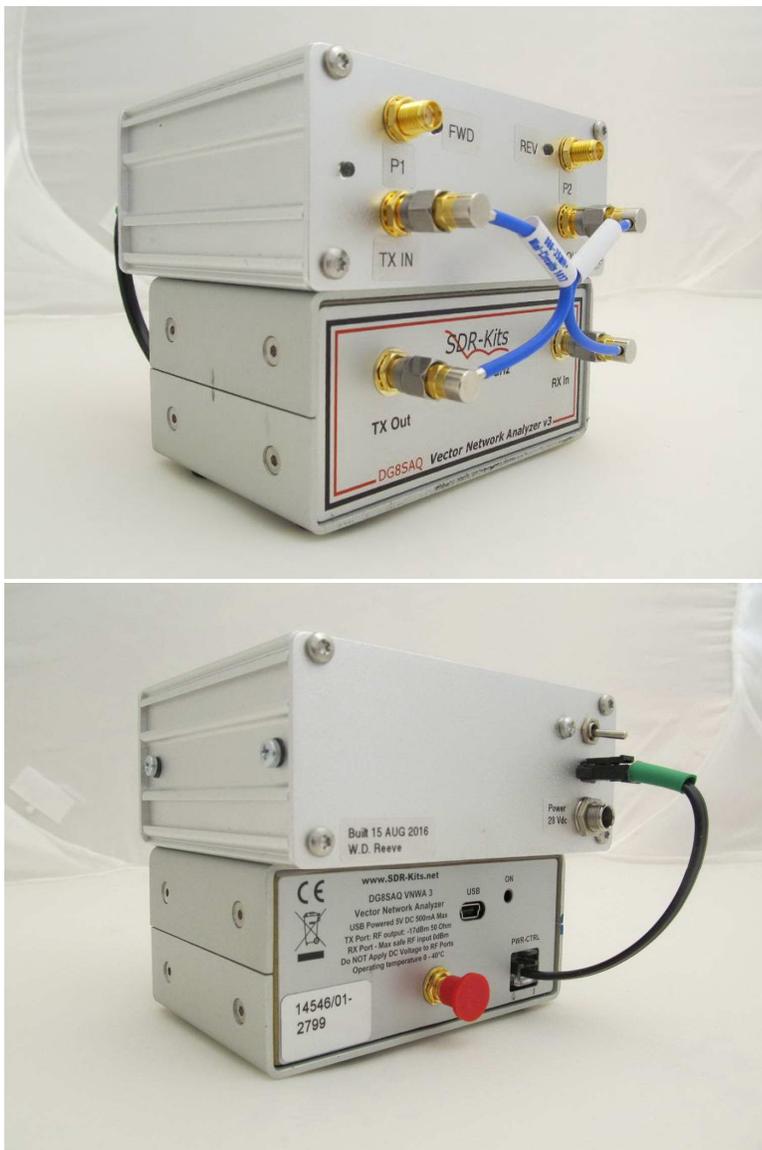


Abbildung 1 ~ Oben: Die Vorderansicht des S-Parameter-Test-Sets V2 ist fest oben auf dem VNWA-3E montiert. Die HF-Verbindungen zwischen den beiden Einheiten erfolgen über handelsübliche Koaxialkabel mit rechtwinkligen SMA-Steckern. Unten: Rückansicht. Das Testgerät wird von einem externen 28-VDC-Netzteil mit Strom versorgt und der VNWA-3E wird über USB mit Strom versorgt. Ein Steuerkabel verbindet den VNWA-3E mit dem Testgerät. Die rote Kappe am VNWA-3E schützt den nicht verwendeten externen Synchronisationseingang. Bilder © 2016 W. Reeve.

## 2. Schaltungsbeschreibung

Das Blockschaltbild ist für V1- und V2-Testsätze identisch (Abbildung 2). Die Hauptkomponenten sind ein koaxialer Übertragungsschalter und eine Relaischnittstelle. Die Relaischnittstelle verwendet den 0- und 3,3-V-Logikausgang vom Steueranschluss des VNWA-3E. In V1 steuert die Relaischnittstelle ein 28-VDC-Zwischenrelais. Dieses Relais betätigt wiederum den Übertragungsschalter, der Port 1 und Port 2 des Prüflings (DUT) für Vorwärts- und Rückwärtsmessungen konfiguriert. Ich habe die Relaischnittstelle in V2 neu gestaltet, um das Zwischenrelais zu eliminieren und eine minimale Anzahl von Teilen zu verwenden. Beide Versionen verwenden dasselbe Software-Setup für den aktiven Hochbetrieb. Das heißt, 0 V (logisch niedrig) gibt den Übertragungsschalter für Vorwärtsmessungen frei und 3,3 V (logisch hoch) betätigt den Übertragungsschalter für Rückwärtsmessungen (siehe Anhang für die VNWA-3E-Softwareeinstellungen).

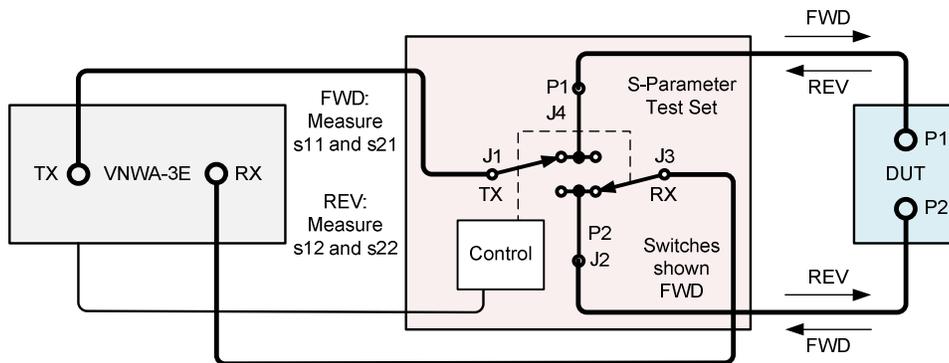


Abbildung 2 ~ Systemblockdiagramm mit dem S-Parameter-Test-Set in der Mitte. Key: P1 = Port 1, P2 = Port 2, TX = Transmit, RX = Receive, DUT = Device Under Test, FWD = Forward, REV = Reverse. Image © 2013 W. Reeve.

Das V1-Testset verwendet einen Darlington-Transistor zur Steuerung des Zwischenrelais. Ein Nachteil des V1-Designs besteht darin, dass die VNWA-3E-Steuerschnittstelle 28 VDC ausgesetzt werden kann, wenn der Steuertransistor ausfällt. Um eine solche Überspannung zu vermeiden, habe ich eine 5,1-V-Zenerdiode über den Relaischnittstelleneingang gelegt (eine vollständige Schaltungsbeschreibung von V1 finden Sie unter {ReeveSPTS}). Im V2-Testset verwende ich einen Optokoppler und einen MOSFET-Leistungsschalttransistor, um den Koaxialübertragungsschalter zu steuern, wodurch das Zwischenrelais und mögliche Überspannungsprobleme beseitigt werden (Abbildung 3). Der resultierende V2-Testset ist einfacher und erfordert nur vier Komponenten zur Steuerung des Übertragungsschalters - eine winzige integrierte Optokopplerschaltung, einen Leistungs-MOSFET, einen Strombegrenzungswiderstand und einen Vorspannungswiderstand.

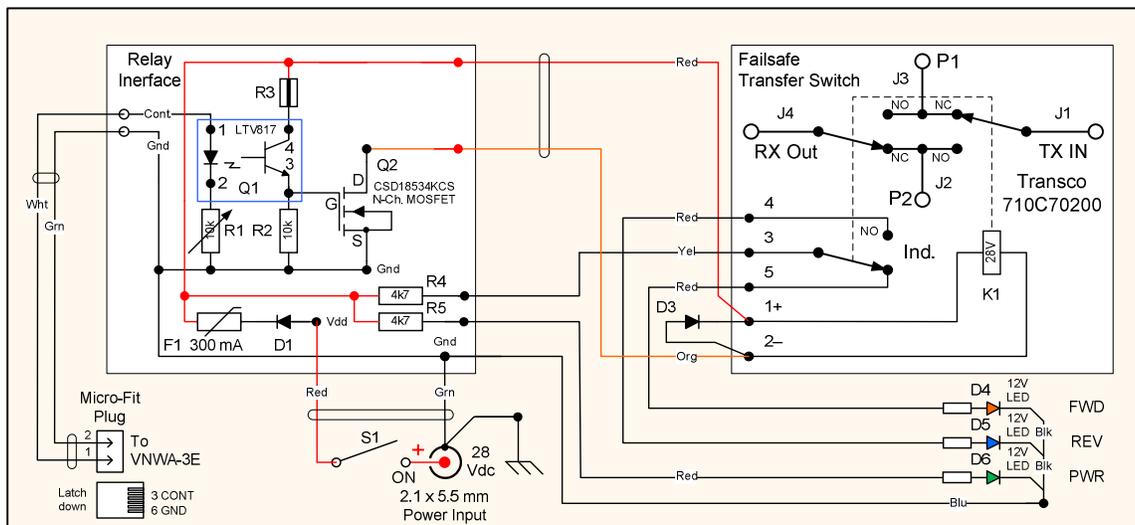


Abb.3 ~ S-Parameter Test Set V2 schematisch. Die Relaischnittstelle basiert auf einem kleinen Prototyp einer Leiterplatte. Bild © 2016 W. Reeve.

Für den Steuereingang habe ich den Optokoppler der Serie LTV-817 gewählt, da er Strom-übertragungsverhältnisse von bis zu 600% (dh Stromverstärkung bis zu 6X) bieten kann. Das Datenblatt zeigt jedoch eine minimale CTR von 50%, daher habe ich diese als anfänglichen Entwurfswert verwendet. Der Optokoppler trennt den VNWA-3E-Steueranschluss von der 28-V-Stromversorgung, sie haben jedoch eine gemeinsame Masse. Etwa die Hälfte der Steuereingangsspannung fällt über die Eingangs-LED des Optokopplers ab. Ich habe einen Vorwiderstand verwendet, um den Ansteuerstrom des Steueranschlusses bei 3,3 V auf <math><0,3\text{ mA}</math> zu begrenzen. Ich habe mit einem Strombegrenzungswiderstand von 10 kOhm am Eingang begonnen. Der Eingangsstrom wird effektiv auf den Fototransistor in der Geräte-ausgangsschaltung übertragen; Mit dem 10-kOhm-Widerstand am Eingang war jedoch nicht genügend Aus-gangsstrom vorhanden, um den MOSFET in die Leitung vorzuspannen, als ich die Steuereingangsspannung auf 2,5 V reduzierte (ich verwendete diese niedrigere Spannung als Worst-Case). Die Reduzierung des Widerstands auf 6 kOhm ermöglichte ein zuverlässiges Schalten, daher verwendete ich einen 10-kOhm-Trimpot, der ursprünglich auf 6 kOhm eingestellt war.



Die Nennstromstärke des MOSFET CSD18534KCS (73 A) ist für diese Anwendung stark überdimensioniert, kostet jedoch nur etwas mehr als 1 USD. Ich fand durch Messung, dass mit einer Steuereingangsspannung von 3,2 V und einem Eingangsstrom von 0,3 mA. Der Optokoppler liefert einen Ausgangsstrom von 0,41 mA in den 10 kOhm Gate-Vorspannungswiderstand oder ein Stromübertragungsverhältnis von 133%. Dadurch wird das MOSFET-Gate auf 4,1 V vorgespannt, wodurch es mit einem Abfall von etwa 0,8 mV von Drain zu Source eingeschaltet wird, was einem Einschaltwiderstand von 8 Milliohm entspricht. Die Vorspannung und der Einschaltwiderstand liegen sehr nahe an den typischen Datenblattwerten für diesen MOSFET.



Der Übertragungsschalter ist ausfallsicher (gleicher Typ, aber anderes Modell als V1). Dies bedeutet, dass der Schalter beim Entfernen der Stromversorgung in seiner normalerweise geschlossene Position verbleibt, wenn er nicht bereits dort ist. Ich habe mich für den ausfallsicheren Typ entschieden, da sich der Übertragungsschalter immer in einer bekannten Position befindet (freigegeben), ohne dass das Testgerät mit Strom versorgt wird. Umgekehrt bleibt ein Verriegelungsschalter in seiner letzten Position, wenn die Stromversorgung unterbrochen wird.



Der von mir verwendete Schalter hat Positionsanzeigekontakte und ich habe sie über einen gemeinsamen 4,7 kOhm Strombegrenzungswiderstand, der für 5 mA Strom mit einer Betriebsspannung von 28 VDC gewählt wurde, mit LED-Anzeigen verbunden. Ich habe den Widerstandswert experimentell bestimmt, da die vorverdrahteten LEDs, die ich auf Lager habe, bereits Spannungsabfallwiderstände für Nennbetriebe von 12 V enthalten.

Neben der Betriebsart sind die wichtigen Attribute des Übertragungsschalters Frequenzbereich, Betriebs-spannung, Port-Port-Einfügungsverlust und Port-Port-Isolation. Der Nennfrequenzbereich des VNWA-3E liegt zwischen 100 kHz und 1,3 GHz, kann jedoch für Frequenzen unter und über konfiguriert werden. Um diesen Bereich mit einem gewissen Spielraum zu berücksichtigen, sollte der Übertragungsschalter einen Frequenzbereich von mindestens Gleichstrom bis 2 GHz haben.

Die häufigste Übertragungsschalterspannung beträgt 28 VDC, und das ist die Spannung, die der Schalter im V2-Testset benötigt. Es stehen jedoch andere Spannungen zur Verfügung, die problemlos angepasst werden können. Der Transco-Schalter in V2 zieht bei Aktivierung etwas mehr als 100 mA. Um den induktiven Rückschlag von der Schaltspule zu verringern, habe ich eine Diode direkt über den Spulenanschlüssen installiert, anstatt die Diode auf der Relaischnittstellenkarte zu platzieren.

Eine hohe Isolation der Übertragungsschalterports ist wichtig, da sie die Interaktion zwischen den Sende- und Empfangsports des VNWA-3E während der Kalibrierung und Messungen verringert. Die Isolation ist das Verhältnis der Sendeleistung zur Empfangsleistung, gemessen in dB, ohne direkte Verbindung zwischen Sende- und Empfangsanschluss. In praktischen Systemen besteht aufgrund von Leckagen eine gewisse Übersprech-kopplung zwischen Sende- und Empfangsanschlüssen. Das Datenblatt des Transco-Übertragungsschalters zeigt eine Isolation von mindestens 80 dB von Gleichstrom bis 1 GHz und 60 dB von 1 bis 4 GHz. Später diskutierte Messungen bestätigen diese Spezifikationen auf 1,3 GHz.

Das Testgerät wird über eine koaxiale Gleichstrombuchse, einen SPST-Kippschalter, eine Polaritätsschutzdiode und eine rücksetzbare 300-mA-60-V-PTC-Sicherung mit Strom versorgt. Das Einschalten wird durch eine vorverdrahtete 12-V-LED mit einem externen Spannungsabfallwiderstand von 4,7 kOhm angezeigt. Die Betriebsanzeige-LED könnte entfallen, da die eine oder andere Anzeige für die Positionsanzeige des Übertragungsschalters immer leuchtet, wenn Strom angelegt wird.

### 3. Komponentenauswahl und Konstruktion

In der Stückliste (Stückliste, Tabelle 1) sind alle in V2 des S-Parameter-Testsatzes verwendeten Teile aufgeführt. Die kritischste Komponente ist der koaxiale Übertragungsschalter, der von höchster Qualität sein sollte. Gebrauchte hochwertige Schalter sind bei Online-Auktionen und Verkäufern gebrauchter Mikrowellengeräte für ab 25 USD erhältlich. Obwohl in der Stückliste ein Transco-Bestellnr. 710C70200 angegeben ist, passen ein Teledyne-Bestellnr. CS3751C und zweifellos auch andere in das in der Stückliste angegebene Gehäuse (die kritischen Abmessungen sind Höhe und Tiefe). Die restlichen Teile kosten ca. 25 USD und die sechs Verbindungskabel kosten ca. 85 USD (das V1-Test-Set verwendet nur zwei Verbindungskabel).

Tabelle 1 ~ Stückliste für V2 S-Parameter-Testsatz (mit „Generic“ gekennzeichnete Elemente sind nicht kritisch)

Item	Qty	P/N	Manufacturer	Beschreibung
1	1	710C70200	Transco (Dow-Key)	Koaxialer Übertragungsschalter, ausfallsicher, 28 VDC (siehe Text)
2	1	B3-080-SI	Box Enclosures	Gehäuse aus stranggepresstem Aluminium, silber eloxiert, 104 x 44 x 80 mm
3	1	MF-R030	Bourns	PTC rücksetzbare Sicherung, 300 mA Haltestrom, 60 V.
4	1	Generic	Generic	Koaxiale Gleichstrombuchse 2,1 x 5,5 mm
5	1	Generic	Generic	Kippschalter, SPST, Subminiatur
6	1	CSD18534KCS	Texas Instruments	Power MOSFET, N-channel, 60 V
9	1	LTV-817	Lite-On	Optokoppler-integrierte Schaltung, ≥ 50% CTR
10	1	1N5819	Generic	Diode, Schottky, 1 A, 40 V
11	1	1N4002	Generic	Diode, 1A, 100 V
12	1	Generic	Generic	LED, grün, vorverdrahtet (siehe Text) 12 V, 3 mm, Betriebsanzeige
13	1	Generic	Generic	LED, gelb, vorverdrahtet 12 V, 3 mm, Vorwärtsanzeige
14	1	Generic	Generic	LED, blau, vorverdrahtet 12 V, 3 mm, Reverseanzeige
15	1	43640-0200	Molex	Stecker, Schalttafeleinbau, Mini-Fit mit 2 Positionen
16	1	43645-0200	Molex	Buchse, Kabelgehäuse, 2-Positionen Mini-Fit
17	1	43031-0007	Molex	Steckerklemmenkontakt, 20-24 AWG (für Mini-Fit-Stecker)
18	1	43030-0010	Molex	Buchsenkontakt, 26-30 AWG (für Mini-Fit-Gehäuse)
19	1	5-555042-3	AMP (TEC)	Modularer Stecker, 6 Positionen, 6 Kontakte
20	1	Generic	Generic	Widerstand, 10k Ohm, 5%, 1/4 W
21	1	3296W-103	Bourns	Trimpot, 10 kOhm, 1/2 W (voreingestellt auf 6 kOhm)
22	3	Generic	Generic	Widerstand, 4k7 Ohm, 5%, 1/2 W
23	2	Generic	Generic	Prototyp Leiterplatte, nach Bedarf zugeschnitten
24	2	Generic	Generic	Abstandshalter, Stecker-Buchse, M3 x 5 x 6 mm (Leiterplattenbefestigung)
25	2	Generic	Generic	Maschinenschraube, Flachkopf, M3 x 8 mm
26	2	Generic	Generic	Sechskantmutter, 3 mm
27	4	Generic	Generic	Unterlegscheibe, innerer Stern, 3 mm
28	1	7317	Keystone	Erdungsklemme, interner Stern, Bolzen Nr. 4
29	2	Generic	Generic	Maschinenschraube, Schwenkkopf, 4-40 x 0,375 in
30	4	Generic	Generic	Sechskantmutter, 4-40
31	3	Generic	Generic	Unterlegscheibe, flach, # 4
32	7	Generic	Generic	Unterlegscheibe, interner Stern, Nr. 4
33	2	Generic	Generic	Maschinenschraube Flachkopf 4-40 x 0,25 in
34	4	Generic	Generic	Maschinenschraube, Flachkopf, 4-40 x 0,375 in
35	1	Generic	Generic	Abstandshalter, isoliert, 4-40
36	36 in	WH24-0X	NTE	Litzenanschlussdraht, 24 AWG, 300 V, X = Farbe
37	4.5 in	Generic	Generic	Modulares Kabel, 4- oder 6-adrig (siehe Text)

38	2	141-3SM+	Mini-Circuits	Hand-Flex-Kabel, SMA-M: SMA-M, Durchmesser 0,141, Länge 3 in
39	4	086-4SBSMR+	Mini-Circuits	Hand-Flex-Kabel, SMA-FB: SMA-MRA, Durchmesser 0,086, Länge 4 in

Die Stückliste zeigt metrische und nicht metrische Hardware und Verbindungselemente, da ich das verwendet habe, was ich zur Verfügung hatte oder für die Kompatibilität mit einzelnen Teilen benötigte. Steuerungs- und Stromkabel sind Punkt-zu-Punkt und nicht kritisch. Ich habe für alle Verkabelungen Litzen-Anschlussdrähte mit 24 AWG verwendet. Die vorverdrahteten LEDs haben 26 AWG-Kabel. Erbauer sollten ihre eigenen Ressourcen verwenden und die Stückliste entsprechend ändern.

Das Steuerkabel erfordert einen modularen Stecker mit 6 Positionen und 6 Kontakten (normalerweise als RJ11 oder RJ12 bezeichnet) des Typs, der für Telefonkabel verwendet wird. Die meisten Telefonkabel verwenden jedoch nur zwei oder vier Leiter an den Positionen 3 und 4 oder 2, 3, 4 und 5. Der VNWA-3E verwendet die Positionen 3 (Steuerung) und 6 (Masse). Es gibt zwei Alternativen: 1) Stellen Sie Ihr eigenes Kabel mit einem modularen Stecker, einem 4- oder 6-adrigen Telefonkabel und dem dazugehörigen Crimpwerkzeug her, das in den meisten Baumärkten erhältlich ist (stellen Sie sicher, dass der Stecker 6 Kontakte hat). oder 2) Suchen Sie ein modulares Kabel mit einem 6-adrigen Kabel und schneiden Sie es ab. Wenn Sie Ihr eigenes Kabel mit einem 4-adrigen Kabel herstellen, muss es zu einer Seite des Steckers versetzt sein, damit die Drähte an den Positionen 3, 4, 5 und 6 enden. Die modulare Steckerbelegung wird in der unteren linken Ecke angezeigt des Schaltplans. Das Kabel wird am Ende des Testsatzes an der Mini-Fit-Kabelgehäusebuchse abgeschlossen.

Ich habe ein Stück 1 x 3 in einer Prototyp-Leiterplatte für die Relaischnittstelle verwendet (Abbildung 4), aber es könnte viel kleiner sein. Die Art der Konstruktion ist nicht kritisch. Messingabstandshalter halten die Leiterplatte an einer Seitenwand im Gehäuse. Auf der Rückseite befinden sich der Ein-Aus-Kippschalter, die koaxiale Gleichstrombuchse und der Steuereingangsstecker. Auf der Vorderseite befinden sich die HF-Anschlüsse und LED-Anzeigen.

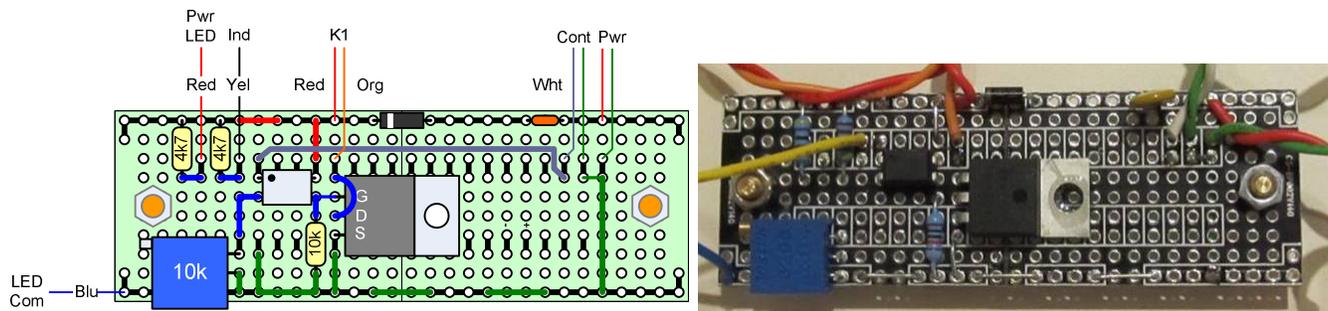


Abbildung 4 ~ Links: Skalierte Visio-Zeichnung der Relaischnittstellenplatine; Abmessungen sind 1 x 3 Zoll. Alle Komponenten außer der Kickback-Diode über der Übertragungsschaltspule, sind auf der Platine montiert. Rechts: Foto der fertigen Tafel. Die Platine wurde mit Pigtails vorverdrahtet und vor der Montage im Gehäuse getestet. Bild © 2016 W. Reeve.

Da eines meiner Ziele darin bestand, das S-Parameter-Test-Set physisch an das VNWA-3E anzupassen, musste ich mich entscheiden, ob ich ein Gehäuse bauen oder kaufen wollte. Ich habe viel Zeit damit verbracht, nach einer hergestellten Einheit mit den richtigen Abmessungen zu suchen, und eine gefunden, die einigermaßen nahe ist, also habe ich mich für den Kauf entschieden. Die VNWA-3E-Abmessungen betragen 104 x 50 x 68 mm ohne Anschlüsse.

Das nächstgelegene, das ich finden konnte, ist ein Gehäuse aus extrudiertem Aluminium von einer Firma (entsprechend) namens Box Enclosures & Assembly Services mit den Abmessungen 109 x 45 x 81 mm, innerhalb von 5 mm in Breite und Höhe, aber etwas tiefer als das VNWA-3E. Dieses Gehäuse ist rohrförmig und nicht in zwei Hälften geteilt, was die Installation der Komponenten etwas mühsam macht. Der koaxiale Übertragungsschalter, die Relaischnittstelle und die Kabel des Testgeräts nehmen viel Platz ein, aber mit ein wenig Layoutplanung habe ich alles passend gemacht.

Ich habe die Panels in Microsoft Visio ausgelegt und die Papiervorlagen gedruckt, die ich zum Markieren und anschließenden Bohren auf die leeren Panels geklebt habe (Abbildung 5). Der an der Schalttafel montierte Steuerstecker ist die einzige Komponente mit einer ungewöhnlichen Form. Ich bohrte eine Reihe von 2,5-mm-Löchern und verwendete dann Juwelierfeilen für die endgültige Formgebung. Ich habe eine kleine Menge Epoxidharz auf der Rückseite der Frontplatte verwendet, um die drei LEDs an Ort und Stelle zu halten. Die selbstklebenden Etiketten auf dem Gehäuse werden mit einer Etikettiermaschine mit schwarzer Beschriftung auf klarem Hintergrund hergestellt (Abbildung 6).

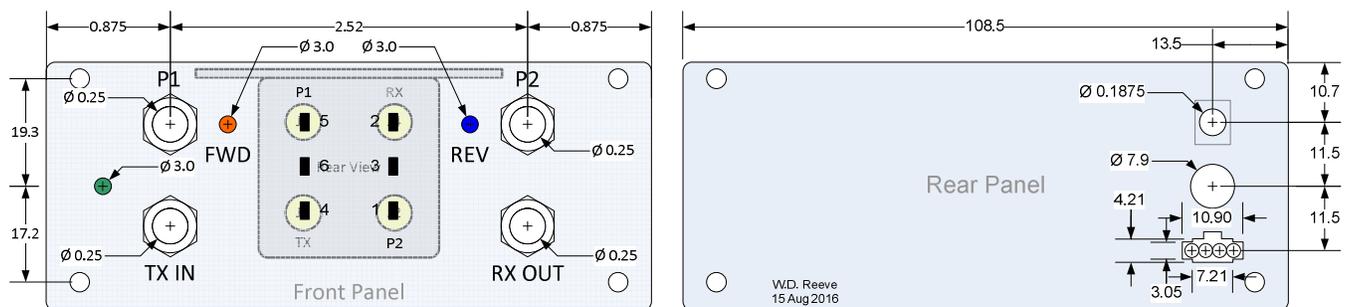


Abbildung 5 ~ Die Layoutzeichnung des Gehäuses zeigt die Schnitt- und Bohrabmessungen. Abmessungen in Zoll und Millimetern berücksichtigen Datenblattwerte. Die Montage des Übertragungsschalters hängt vom tatsächlich verwendeten Schalter ab. In diesem Fall habe ich den Übertragungsschalter so an der Gehäusedecke angebracht, dass seine Schalteranschlüsse mit den VNWA-3E-Anschlüssen übereinstimmen. Bild © 2016 W. Reeve.



Abbildung 6 ~ Vordere (linke) und hintere (rechte) Endplatte. Die Beschriftung erfolgt schwarz auf klaren Etiketten. Was anscheinend drei leere Löcher in der Frontplatte sind, sind die klaren Linsen der LEDs für die Position des Stromversorgungs- und Übertragungsschalters. Im rechten Bild befindet sich der Steueranschluss zwischen dem Kippschalter (oben) und der Gleichstrombuchse (unten). Nach dem Bohren der Löcher wurde mir jedoch klar, dass die Gleichstromsteckdose zwischen dem Schalter und dem Steuerstecker platziert werden sollte, um geringfügige mechanische Probleme zu vermeiden Interferenz zwischen den beiden Kabeln. Die Visio-Layoutzeichnung in der vorherigen Abbildung ist korrekt. Bilder © 2016 W. Reeve.

Ich schneide die meisten Löcher mit einem Pilotbohrer und vergrößere sie nach Bedarf mit einem anderen Bohrer oder Stufenbohrer. Die LED-Löcher müssen einen Durchmesser von 3,0 mm haben, sofern kein LED-Halter verwendet wird. In die obere Klappschalenabdeckung des VNWA-3E müssen zwei Löcher geschnitten werden, und in den Boden des Rohrgehäuses des Testsets müssen passende Löcher geschnitten werden. Um die Ausrichtung zu gewährleisten, habe ich die beiden Teile zusammengeklemmt und mit einem Gewindebohrer geschnitten. Ich vergrößerte dann die Löcher in der VNWA-3E-Abdeckung mit einem Bohrer und schnitt Gewinde in die Löcher im Testset.

Für interne Koaxialverbindungen habe ich Hand-Flex-Kabel der Serie 086 von Mini-Circuits mit einem Durchmesser von 2,2 mm und SMA-Steckern {MCL} verwendet. Die Anschlüsse am Schalterende sind rechtwinklig. Für externe Verbindungen vom VNWA-3E zum Testgerät habe ich zunächst dieselben Serienkabel verwendet, später jedoch die Hand-Flex-Kabel der Serie MCL 141 mit einem Durchmesser von 3,6 mm (0,141 Zoll) verwendet. Beide Größen verwenden ein mit Lötmedium geflutetes Geflecht, sind relativ kostengünstig und ihre elektrischen Eigenschaften sind sehr stabil und gut dokumentiert. Obwohl Mini-Circuits Kabel mit beliebiger Länge herstellen, habe ich ihre Standardkatalogkabel verwendet: 4 Zoll für die Innenkabel und 3 Zoll für die Außenkabel. Die Längentoleranz der Hand-Flex-Kabel beträgt 1,27 mm. Ein doppelt geflochtenes Koaxialkabel wie RG-316 / U könnte die Mini-Circuits-Kabel ersetzen, aber angesichts der Steckerkosten und des Arbeitsaufwandes bei SMA-Steckverbinderinstallationen ergeben sich möglicherweise keine lohnenden Kosteneinsparungen.

Der Übertragungsschalter nimmt den meisten Platz ein und die Innenkabel müssen um ihn und die Relaischnittstellenkarte herum verlegt werden (Abbildung 8). Der Netzschalter, die Netzbuchse und der Steueranschluss erstrecken sich in das Gehäuse und müssen zur Seite montiert werden, um Störungen des Übertragungsschalters und der zugehörigen Kabel zu vermeiden. Aufgrund der röhrenförmigen Konstruktion des Gehäuses musste ich die Teile in einer bestimmten, zeitaufwändigen Reihenfolge installieren, nachdem ich alle Löcher gebohrt und die einzelnen Teile getestet hatte. Zuerst habe ich die vier Kabel am Übertragungsschalter installiert und die Steckverbinder auf 90 N-cm (8 in-lb) angezogen, wie von Mini-Circuits empfohlen. Als nächstes montierte ich den Transferschalter mit Flachkopfschrauben im Gehäuse. Ich montierte dann die mit einem Pigtail ausgestattete Relais-Schnittstellenkarte und verdrahtete sie mit dem Übertragungsschalter und der Frontplatte. Ich habe auch die LEDs auf der Vorderseite mit dem Übertragungsschalter und der Relaischnittstellenkarte verbunden. Nachdem die Verkabelung der Frontplatte abgeschlossen war, installierte ich die SMA-Schottverbinder an der Platte und befestigte die Platte am Gehäuse. Als nächstes habe ich die Rückseite vorverdrahtet und die Pigtails von der Relaischnittstelle mit der Rückseite verbunden. Nachdem ich die Rückwand am Gehäuse befestigt und die gesamte Baugruppe oben am VNWA-3E montiert hatte, installierte ich die beiden Verbindungskabel und zog sie mit 90 N-cm an).

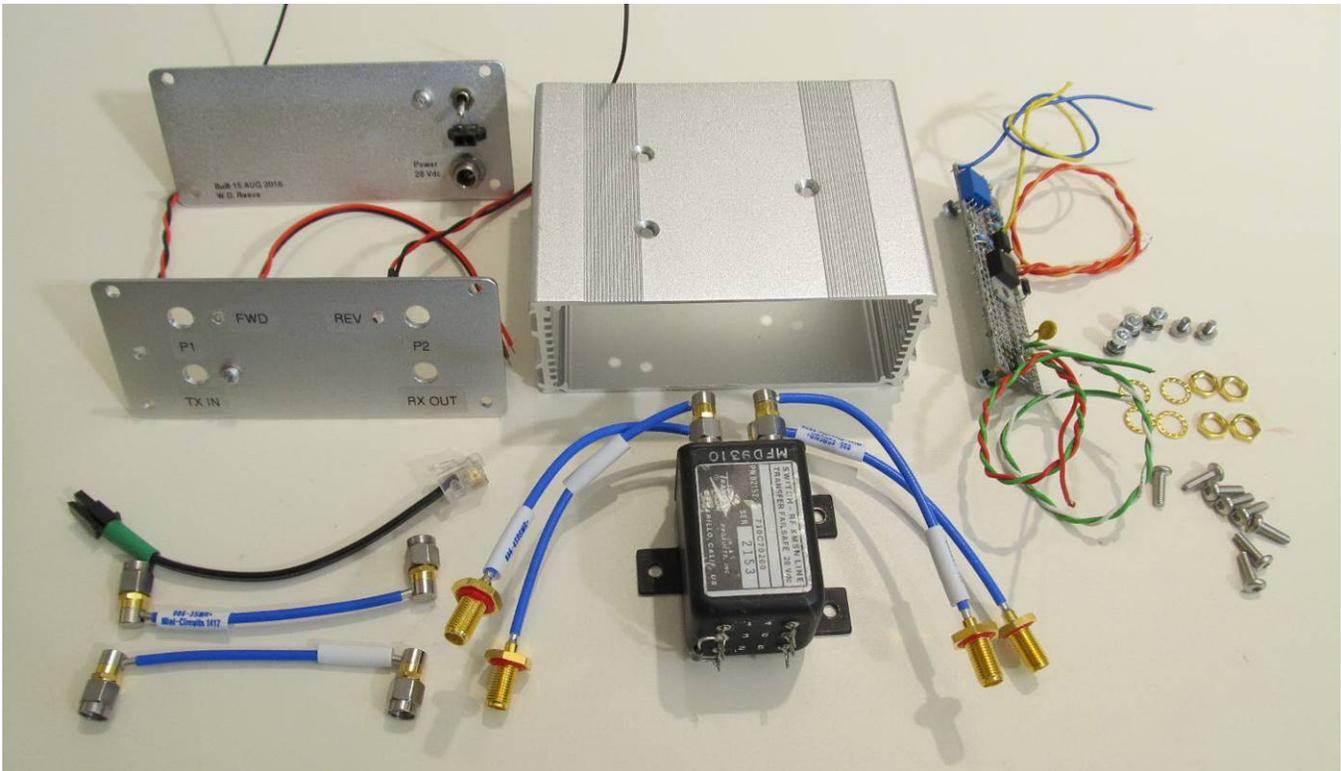


Abbildung 8 ~ Alle Komponenten und Unterbaugruppen vorgebohrt und einbaufertig. Die Vorder- und Rückseite (oben links) und die Relaischnittstellenkarte (oben rechts) wurden vorverdrahtet, und die internen Koaxialkabel wurden am Übertragungsschalter (unten in der Mitte) vorinstalliert. Die beiden Kabel mit blauem Mantel (unten links) verbinden das S-Parameter-Test-Set mit den Steckverbindern VNWA-3E TX Out und RX In. Nachdem dieses Bild aufgenommen wurde, ersetzte ich sie durch Kabel mit einem Durchmesser von 0,141. Das schwarze Kabel links ist das Steuerkabel zwischen dem Testgerät und VNWA-3E. Bild © 2016 W. Reeve.

#### 4. Testen des Test Set

Um zu überprüfen, ob der S-Parameter-Testset und die Verbindungskabel die Gerätemessungen nicht negativ beeinflussen, habe ich eine Reihe von Tests wie folgt durchgeführt (dies sind die gleichen Tests, die mit V1 verwendet wurden):

- ☉ Kalibrieren Sie den VNWA-3E selbst und messen Sie seine Portisolation, schließen Sie das Testset an, messen Sie es erneut und vergleichen Sie es.
- ☉ Kalibrieren Sie den VNWA-3E selbst und führen Sie eine T-Check-Messung durch, schließen Sie das Testgerät an, kalibrieren Sie die Kombination neu, messen Sie erneut und vergleichen Sie.

Der VNWA-3E wurde vor der Kalibrierung und den Messungen einige Stunden lang warmlaufen gelassen und die Kalibrierungen wurden mit Rosenberger SMA-weiblichen Kalibrierungsstandards durchgeführt.

Ich habe bei den V1-Messungen festgestellt, dass die Isolation geringfügig von der Art und Weise abhängt, wie die VNA-Ports abgeschlossen werden - offener Stromkreis, Kurzschluss, 50 Ohm oder etwas anderes; Außerdem variierten die Messungen mit jedem Sweep geringfügig (bis zu 5 dB) - was zeigt, dass konsistente Messungen mit sehr niedrigen Signalpegeln sehr schwierig durchzuführen sind. Ich habe beschlossen, alle Isolationsmessungen mit beiden Ports durchzuführen, die mit 50 Ohm abgeschlossen sind (Abbildung 9).

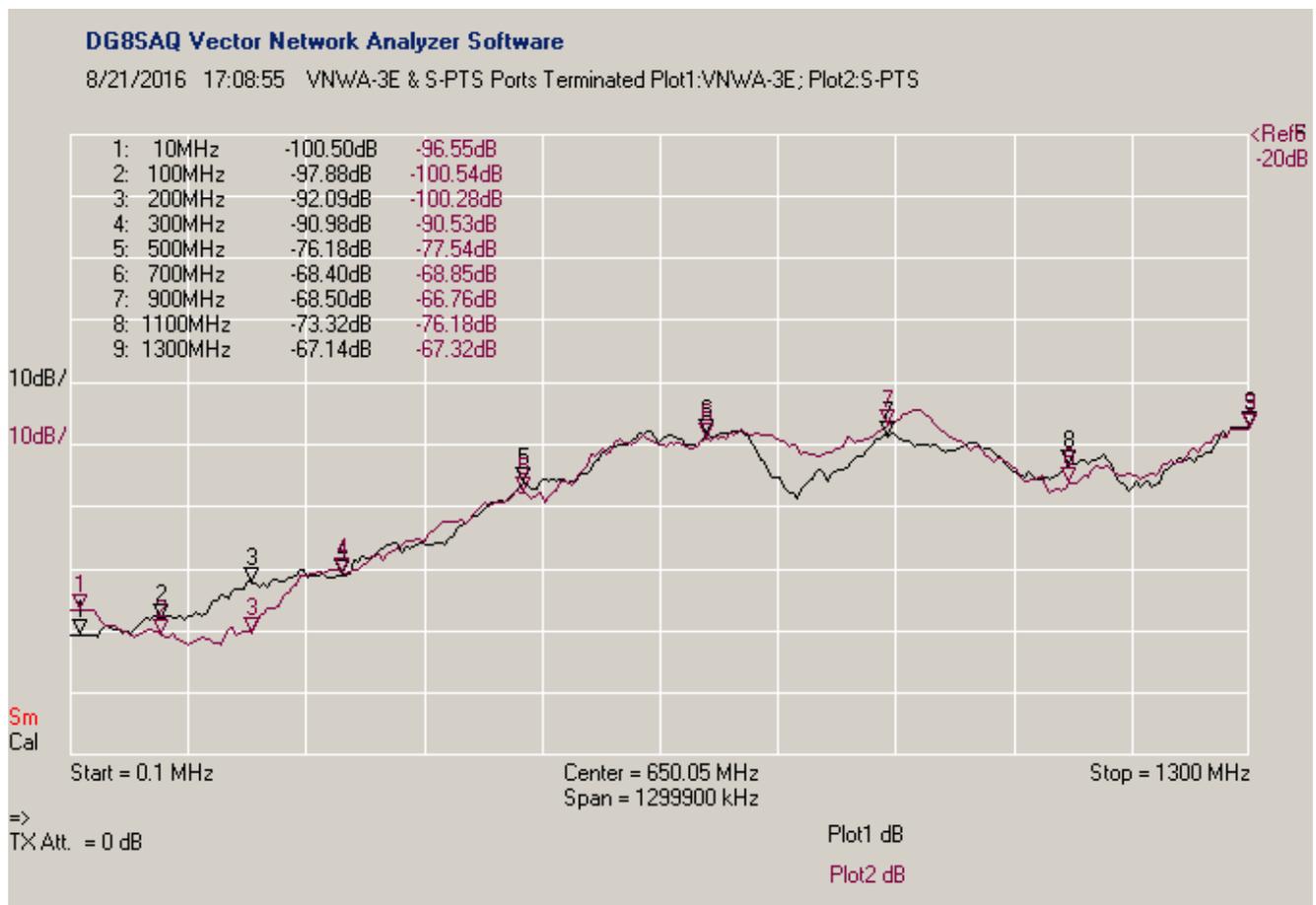


Abbildung 9 ~ Der Verlust der Übersprechkopplung (Isolation) wurde in Vorwärts- (S21) und Rückwärtsrichtung (S12) von 0,1 bis 1300 MHz mit 50-Ohm-Anschlüssen an beiden Ports gemessen. Hier wird nur die Vorwärtsrichtung angezeigt. Schwarze Spur: VNWA-3E für sich (Sende- und Empfangsport beendigt); Lila Spur: Kombination aus S-Parameter Test Set und VNWA-3E (P1 und P2 terminiert).

Diese Ergebnisse zeigen nur eine geringe Verschlechterung bei einigen Frequenzen und eine leichte Verbesserung bei anderen; Diese Unterschiede können jedoch auf Messfehler bei extrem niedrigen Signalpegeln zurückzuführen sein. Alle Messungen liegen in dB unter dem Sendeleistungspegel. Beispielsweise zeigt eine Messung von -80 dB eine Isolation von +80 dB zwischen den Eingangs- und Ausgangsanschlüssen an. Die Plotreferenz beträgt -20 dB bei der Gitterteilung 10 (oben im Diagramm) und die vertikale Skala beträgt 10 dB / Division. Die Markierungen zeigen die Kopplung bei ausgewählten Frequenzen an.

Wie ich in meinem V1-Artikel erwähnt habe, ist der T-Check ein VNA-Genauigkeitstest, der von Rohde & Schwarz in {T-Chk} beschrieben wurde. Es ist elektrisch und mechanisch sehr einfach und erfordert nur einen koaxialen T-Übergang und eine Last von 50 Ohm am Zweig (die Baugruppe wird als T-Adapter bezeichnet). Nach der normalen Kalibrierung wird der T-Adapter zwischen die beiden Testanschlüsse des VNA oder des Testsatzes (Abbildung 10) eingesetzt und eine Reihe von Messungen durchgeführt.



Abbildung 10 ~ T-Check-Verbindungen. Ein koaxialer T-Übergang (obere Bildmitte am Ende der blauen Kabel) mit einer Last von 50 Ohm am Zweig wird nach der Kalibrierung zwischen die beiden Test-Set-Ports eingefügt (die Kalibrierung umfasst die beiden Testkabel). Die resultierenden S-Parameter-Messungen werden dann in der T-Check-Formel verwendet, um die Abweichung von der idealen parallelen 25-Ohm-Impedanz (50-Ohm-Last parallel zum 50-Ohm-Empfangsanschluss am VNWA-3E) zu berechnen. Bild © 2016 W. Reeve.

Die externe Last von 50 Ohm am T-Adapter verläuft parallel zur internen Impedanz von 50 Ohm des VNA-Empfangsports und ergibt eine kombinierte Impedanz von 25 Ohm. Der VNA misst einen vollständigen Satz von Vorwärts- und Rückwärts-S-Parametern und die Software wendet sie an jedem Messpunkt auf die folgende T-Check-Formel an.

$$\frac{|S_{11}S_{21}^* + S_{12}S_{22}^*|}{\sqrt{(1-|S_{11}|^2 - |S_{12}|^2)(1-|S_{21}|^2 - |S_{22}|^2)}}$$

Wobei  $S_{21}^*$  und  $S_{22}^*$  sind komplexe Konjugate. Diese Formel wird vom Benutzer in der VNWA-3E-Software als Texteingabe in einem Custom Trace eingerichtet:

$$abs(s11*conj(s21)+s12*conj(s22))/(sqrt((1-abs(s11)^2-abs(s12)^2)*(1-abs(s21)^2-abs(s22)^2)))$$

Für eine perfekte Messung beträgt das Ergebnis an jedem Punkt 100% (1,0 oder keine Abweichung). Bei praktischen Messungen tritt eine gewisse Abweichung auf. Rohde & Schwarz verwendet ein einfaches Abweichungsbewertungssystem wie folgt:

- ⊗ Grün: 100 ± 10% (geringfügig)
- ⊗ Gelb: 100 ± 10 bis 15% (akzeptabel)
- ⊗ Rot: 100 ± 15% und höher (Inakzeptabel oder Rotalarm)

Die T-Check-Messungen der Kombination aus VNWA-3E und V2 S-Parameter-Testset ergaben gute Ergebnisse mit einem Messwert von über 96 bis 101% (grün) im gesamten Frequenzbereich (Abbildung 11).

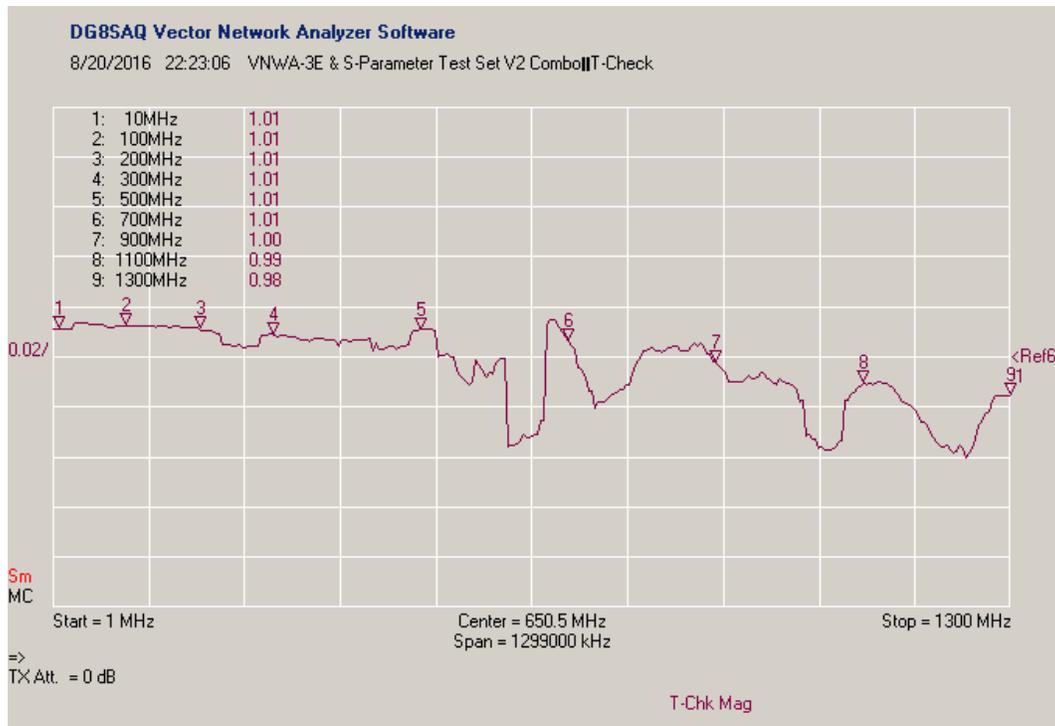


Abbildung 11 ~ T-Check-Ergebnisse für die Kombination aus VNWA-3E und S-Parameter-Testsatz über einen Frequenzbereich von 1 bis 1300 MHz. Der T-Check wird als Custom Trace mit der Bezeichnung „T-Chk Mag“ eingerichtet. Die vertikale Skala wird für eine Abweichung von 2% / Division mit 100% auf der 5. Gitterteilung angepasst. Im Idealfall ist die Kurve eine horizontale Linie bei 100% Referenz. Die tatsächlich gemessene Abweichung vom Ideal beträgt <5% über den gesamten Frequenzbereich, was als „geringfügige“ Abweichung angesehen wird (siehe Text)).

Ich habe viele Vergleichsmessungen durchgeführt und keinen Unterschied zwischen den V1- und V2-Testsätzen festgestellt. Eine Reihe von S-Parameter-Messungen an einem Bandpassfilter von 100 kHz bis 100 MHz zeigte konsistent einen Unterschied von <0,05 dB. Dies ist insofern bemerkenswert, als die Unsicherheit bei den Messungen wahrscheinlich 0,5 dB überschreitet.

## 5. Schlussfolgerungen

Dieser Artikel beschreibt Version 2 eines kostengünstigen und einfach zu erstellenden S-Parameter-Test-Sets für den VNWA-3E. Die Leistung ist identisch mit Version 1, sie ist jedoch einfacher zu lagern und kann bewegt werden, ohne die Verbindungskabel zu stören. Die Kosten für V2 sind höher als für V1, da V2 vier zusätzliche hochwertige Koaxialkabel verwendet.

## 6. Verweise

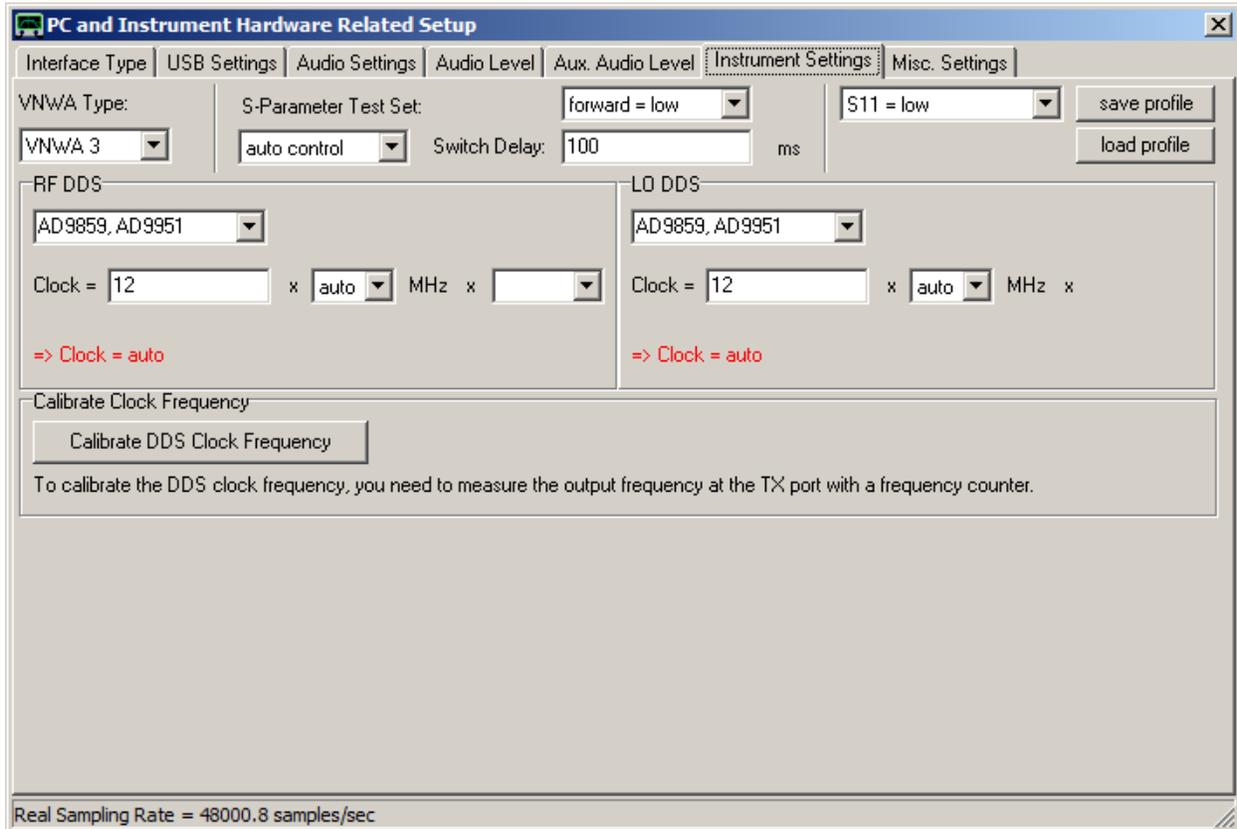
{MCL} [http://www.minicircuits.com/products/test\\_flex.shtml](http://www.minicircuits.com/products/test_flex.shtml)

{ReeveSPTS} Reeve, W., Building an S-Parameter Test Set for the VNWA-3E Vector Network Analyzer, 2013:  
[http://www.reeve.com/Documents/Articles%20Papers/Reeve\\_S-ParamTestSet.pdf](http://www.reeve.com/Documents/Articles%20Papers/Reeve_S-ParamTestSet.pdf)

{T-Chk} T-Check Accuracy Test for Vector Network Analyzers Utilizing a Tee-junction, 1EZ43, Rohde & Schwarz, 1998:  
[http://www.rohde-schwarz.com/en/applications/t-check-accuracy-test-for-vector-network-analyzers-utilizing-a-tee-junction-application-note\\_56280-15519.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/applications/t-check-accuracy-test-for-vector-network-analyzers-utilizing-a-tee-junction-application-note_56280-15519.html)

## Anhang

Der folgende Screenshot zeigt die VNWA-3E-Softwareeinstellungen, die für den S-Parameter-Testsatz (sowohl V1 als auch V2) geeignet sind. Auf diese kann über das Options menu – Setup – Instrument Settings tab zugegriffen werden. Die Einstellung für die Schaltverzögerung bestimmt, wie lange die Software zwischen dem Abschluss des Vorwärtsdurchlaufs und dem Beginn des Rückwärtsdurchlaufs wartet, um Zeit für das Einstellen des Übertragungsschalters bereitzustellen. Auf Wunsch können verschiedene Setups in Profilen gespeichert werden. Die Einstellungen für RF DDS und Calibrate Clock Frequency auf dieser Registerkarte beziehen sich nicht auf den S-Parameter Test Set.



## **Dokumenten information**

Author: Whitham D. Reeve

Copyright: © 2017 W. Reeve

Deutsche Übersetzung:

19.04.2020, DG3OK, Manfred Zillmer