

Lite VNA

Vorwort:

Der Vektorielle Netzwerkanalysator Lite VNA ist ein kleines kostengünstiges (ca.200Euro) HF-Messgerät. Mit ihm können Reflexion und Dämpfung von HF-Bauteilen und passiven Schaltungsaufbauten komplex bestimmt werden. Der Frequenzbereich beträgt 50kHz bis 6,3GHz und die Anschlüsse sind SMA female. Es gibt den Port S11 (Ein-/Ausgang) für die Reflexion- und den Port S21 (Eingang) für die Durchgangsmessung. Da ich in meinem Berufsleben mit einem VNA von Hewlett Packard Typ 8510 bis 50 GHz gemessen hatte, einem Gerät der Königsklasse, interessiert mich nun, was der Lite VNA so kann und wie er aufgebaut ist.

Im folgenden werden die inneren Aufbauten, die Anschlüsse, die Fehlermöglichkeiten und mit Messungen versucht Spezifikationen im Vergleich zu HP aufzustellen.

Aufbau:

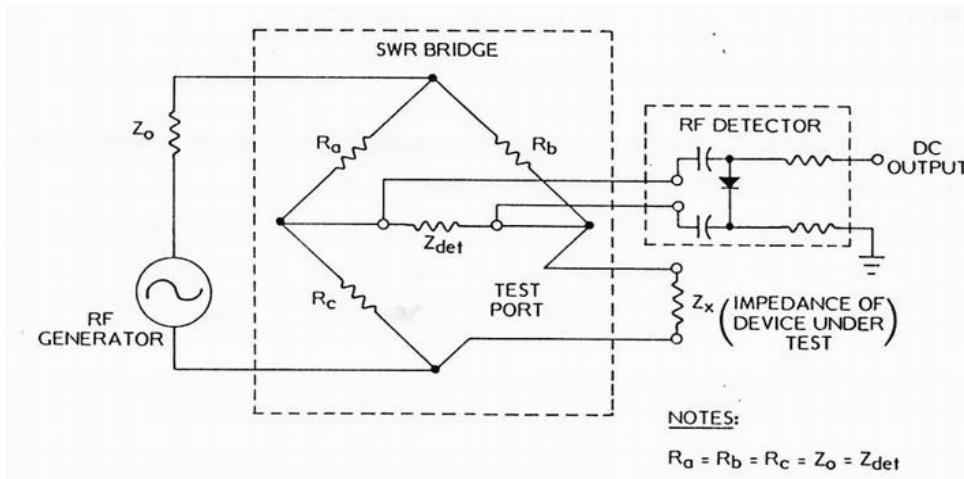
Um Reflexionen messen zu können, befindet sich an einem Port ein HF Bauteil, welches ein Signal richtungsabhängig trennen kann. Hier ist ein typisches Beispiel ein Richtkoppler. Wenn man zwei solche Koppler gegeneinander betreibt, so kann man einmal die am Port auslaufende und mit dem zweiten die am Port einlaufende Welle messen. In diesem Fall ist die einlaufende Welle das reflektierte Signal. Die am Port auslaufende Welle wird am ersten Koppler bestimmt. Die Differenz der zwei Signale in dB bestimmt, nach einer Referenzmessung mit einem Open/Short, die Rückflußdämpfung des Prüflings. Wenn man nur die Beträge bestimmt ist dies der Aufbau eines Skalaren Netzwerkanalysator. Beim VNA werden zusätzlich die Phasen der Signale gemessen. Koppler haben den Vorteil, daß das Meßsignal wenig gedämpft wird, und die Direktivität hoch ist, aber den Nachteil der Frequenzbegrenzung.

In einem professionellen VNA befindet sich an jedem Port eine solche Einheit. Hier ist nur an Port S11 eine solche Möglichkeit gegeben.

Da der Aufbau kompakt ist, hat man sich hier für eine Reflektometer-Brücke entschieden. Sie ähnelt einer Wheastoneschen-Brücke, bei der alle drei Zweige 50 Ohm haben und der vierte Zweig, der Ausgang mit der Last ist. Wenn die Last ideal auch 50 Ohm hat, so ist die Brücke im Gleichgewicht und der Detektor zwischen den Zweigen mißt nichts (Null Volt). Gespeist wird die Brücke von einem Generator. Abweichungen der Last (Z) ergeben unterschiedliche Detektorspannungen. Der Detektor ist erdfrei und der Testport liegt zwischen Erde und einem Detektorarm.

$$U_d = \frac{E}{4} * \left(\frac{Z - R_o}{Z + R_o} \right) \quad (1) \text{ mit: } U_d = \text{Detektorspannung} ; E = \text{Generatorspannung} ; R_o = 50 \text{ Ohm}$$

Da der Term in der Klammer dem linearen Reflexionsfaktor (r) entspricht, kann man ihn leicht aus der Spannung bestimmen. Da in dem kleinen VNA die HF-Bauteile nicht optimal sind, muß bei der Kalibrierung stark korrigiert werden.



Es gibt solche Messbrücken einzeln zu kaufen (siehe nebenstehendes Bild) und man kann sie mit einem Generator und einem Messempfänger (z.B.: Power-Sensor) skalar betreiben. Da es dabei keine Korrekturmöglichkeit wie beim VNA gibt, müssen besonders

Lite VNA

Direktivität und Messtoranpassung von Hause aus gut sein. Von Rohde&Schwarz ist dies Model ZRC und bei Wiltron gab es für die Frequenzbereiche verschiedene Modelle zum Teil auch mit eingebautem Detektor.

Für die Dämpfung (Durchgang) messen zu können muß, das Signal aus Port S11, daß an dem zweiten Port S21 geschwächt ankommt, dort detektiert werde. Es wird hier immer nur von Port 1 nach Port 2 gemessen. An Port 2 gibt es hier, im Gegensatz zu professionellen VNAs, keine Reflexionsmessung. Das ist aber nicht unbedingt nötig. Der Prüfling muß dann nur umgedreht werden um beiden Enden zu messen.

Eine weitere Verarbeitung ist nur möglich, wenn man die Signale mit Hilfe des eingebauten Generators in Mischern auf eine niedere Frequenz herabmischt. Beim HP 8510 wird in zwei Stufen bis auf 100kHz herabgemischt. Hier beim Lite VNA kenne ich die Frequenz nicht. Im Gegensatz zu professionellen Geräten erzeugt der Generator hier keine Sinussignale. In wie weit Oberwellen einen Messeinfluß haben, ist nicht bekannt. Es gibt drei Mischer je für das Referenzsignal, das reflektierte Signal und das Durchgangssignal an Port 2.

In der weiteren Stufe wird nach der Mischung Betrag und Phase der Signale gemessen und dann ausgewertet. Alles ist mit Quarz gesteuert.

Messunsicherheitseinflüsse:

Verständlicherweise sind die Einflüsse auf die Messunsicherheit vielfältig und sie können deswegen bei Hewlett Packard (neu Keysight) oder Anritsu mit einer Software für den Messfall berechnet werden. So ist bei Dämpfung und Reflexion der Meßwert für die Unsicherheit von Betrag und Phase unterschiedlich, nicht nur von der Frequenz. Auch die Kalibriermethode und die Steckerwahl haben einen Einfluß. So gibt es verschiedene Kalibrierkits für die unterschiedlichen Frequenzbereiche und Steckeranschlüsse. Auch können schlechte HF-Kabel und Stecker (mechanische Messung) die Messung negativ beeinflussen.

Bei der Phase ist der Verlauf der Messunsicherheit einleuchtend. Bei Reflexion ist mit $r=0$ der Phasenfehler $\pm 180^\circ$, da der Betragsvektor nicht vorhanden ist. Mit steigendem Reflexionsfaktor fällt die Unsicherheit bei etwa $r \geq 0.4$ auf konstant 1,5 Grad (HP8510). Bei Dämpfung (Transmission) steigt die Messunsicherheit von 0,5 Grad bis 20 dB auf 10 Grad bei 60dB. Auch hier wird mit steigendem Dämpfungswerte der Betragsvektor immer kleiner. Formeln vom HP8510:

$$U_{rp} = \arcsin\left(\frac{U_{rb}}{S_{11}}\right) \quad (2) \quad S_{11}=r \quad U_{tp} = \arcsin\left(\frac{U_{tb}}{S_{21}}\right) \quad (3) \quad S_{21}=\text{Dämpfung (linear)}$$

mit: U_{rp} =Unsicherheit Reflexion Phase U_{tp} =Unsicherheit Transmission Phase

U_{rb} = Unsicherheit Reflexion Betrag U_{tb} = Unsicherheit Transmission Betrag

Die Betragsfehler für die Reflexion sind die Direktivität, die Messtoranpassung am S11 Port, der Reflexionsgleichlauf und Linearitäts- und Rauscheffekte. Die ersten zwei Größen sind am stärksten für die Gesamtunsicherheit verantwortlich. So ist ein Direktivität von 40dB (0,01) und ein Messtoranpassung von 23dB (0,07) für eine passive Messbrücke (R&S) sehr gute Werte.

Es gelten für VNAs:

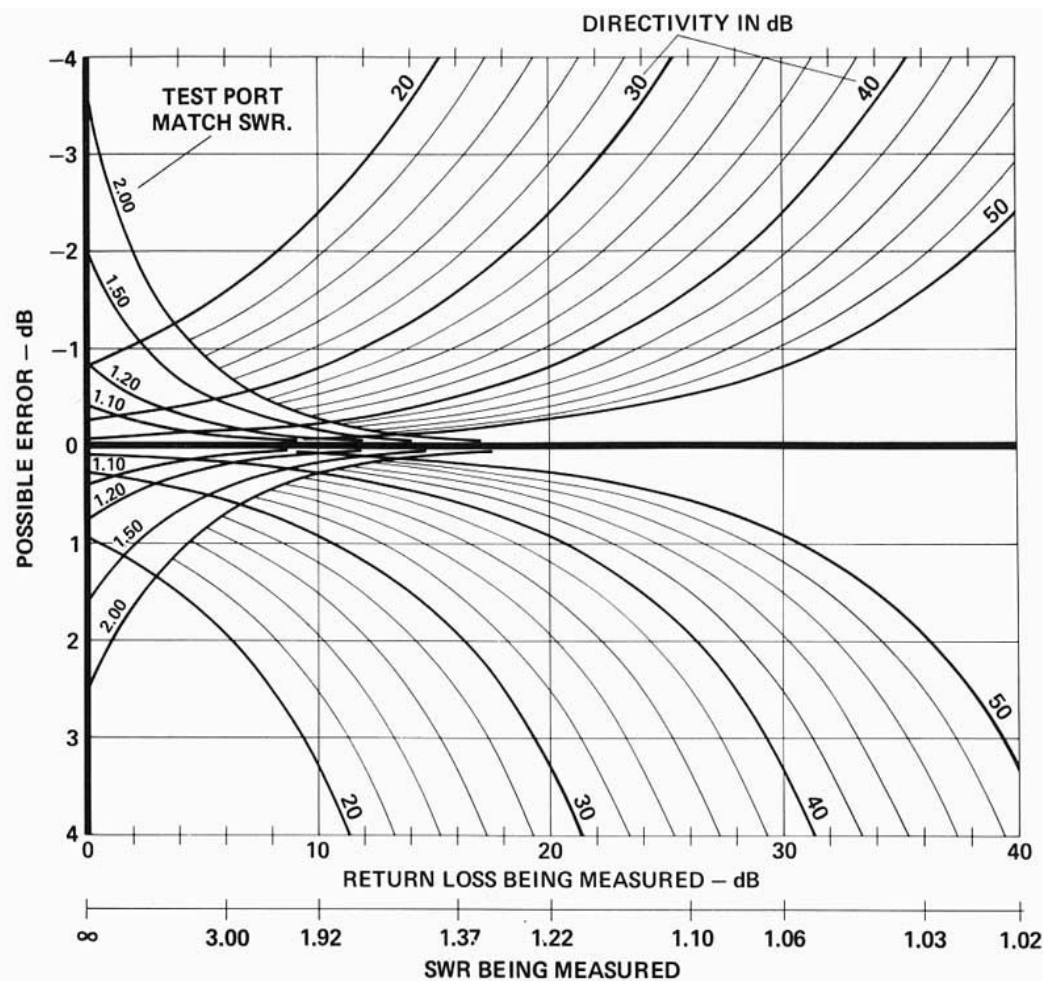
Größe	ohne Cal	mit Cal HP8753	mit Cal HP8510	Passiv R&S ZRC
Direktivität (D)	30 dB (0,03)	40 dB (0,01)	50 dB (0,0032)	40 dB (0,01)
Messtoranpassung (M)	16 dB (0,15)	36 dB (0,015)	40 dB (0,01)	23 dB (0,07)
Gleichlauf (Tr)	$\pm 1,5\text{dB}$ (0,19)	$\pm 0,06\text{ dB}$ (0,006)	$\pm 0,05\text{ dB}$ (0,006)	(0,02)
U_{rb} = bei $r=0,06$ (25dB)	= 0,041	= 0,010	0,0036	0,011

Für die Gesamtunsicherheit gilt grob linear!: $U_{rb} = D + Tr \cdot r + M \cdot r^2$ (4)

An den Ergebnissen von Gleichung 4, sieht man direkt, daß in unserem Messfall ($r=0,06$) die Direktivität in allen Fällen den größten Einfluss bei Reflexionsmessungen hat.

Man sieht auch, daß durch eine Kalibrierung die Fehlergrößen verringert werden können.

Was oft vergessen wird ist, daß Adapter vor dem Port1 die Systemdirektivität erhöhen und damit die Messunsicherheit verschlechtern. Es gilt S_{11} von Adapter $r=0,03 \Rightarrow D_{neu} = 0,01(D) + 0,03 = 0,04$. Auch die Messtoranpassung verschlechtert sich durch Adapter.



Nebenstehende Abbildung:

Zeigt die Fehlerkurven abhängig von der Direktivität und der Messtoranpassung

hier für eine passive Wiltron Messbrücke

Bei niedrigem Return Loss ist der Test Port Match bestimmend

Fehler in dB!

Wenn an einem Koppler oder Messbrücke eine ideale Last angeschlossen würde, dürfte kein Signal "von hinten" hereinkommen. Das ist real nicht der Fall. Deswegen kann man mit sehr guten Loads größer 45dB die Direktivität bis 2GHz bestimmen. Da die Load dann besser als die Direktivität ist, macht sich das im Messwert bemerkbar. Über 2GHz benötigt man eine gestumpfte Slidingload (25dB) um auch die Phase zu messen. Eine Luftleitung mit Last (20dB) und Messung der Welligkeit ist auch möglich. Die Messtoranpassung kann über eine Luftleitung, abgeschlossen mit einem Kurzschluß, wieder eine Welligkeit bestimmt werden. Die Welligkeit entspricht dem Drehzeiger in der Ortskurve.

Bei der Dämpfung (Transmission) spielen natürlich auch die Reflexionen zwischen den Ports und dem Prüfling eine Rolle, da sie einen Teil der Dämpfungsmessung beeinflussen. So wird zum Beispiel der reflektierte Teil am Eingang des Prüflings (Port1) als Verlust am Ausgang registriert.

Lite VNA

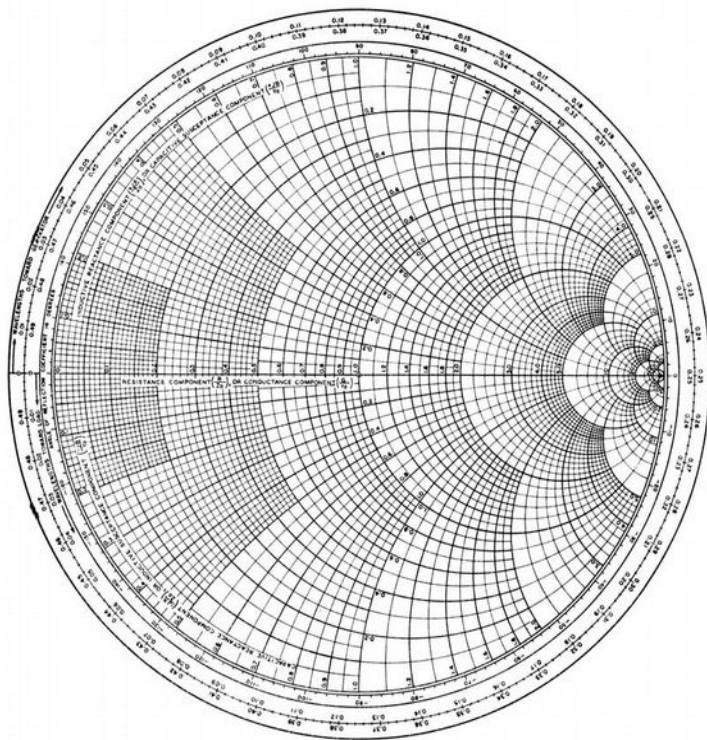
Nicht nur die Fehlanpassung der Ports, sondern auch die Reflexionswerte des Prüflings beeinflussen die Dämpfungswerte stark. Da bei professionellen VNAs an beiden Ports eine Messbrücke vorhanden ist können die Fehlanpassungen zum Teil bestimmt und korrigiert werden. Das ist hier bei dem Lite VNA nicht der Fall. Von dem Empfangsport ist keine Fehlanpassung bekannt und kann auch nicht korrigiert werden. Grundsätzlich, da ja eine Referenz bei 0 dB gemessen wird, steigt mit dem Dämpfungswert des Prüflings auch die Messunsicherheit an. Bei höheren Dämpfungswerten verschlechtert die Messdynamik bestehend aus Linearitätsfehlern und Rauschen das Gesamtergebnis.

So ist bei HP8510: $U_{tb}=0,1\text{dB}$ unter 20 dB ; $U_{tb}=0,2\text{dB}$ unter 40dB bei 60dB ist $U_{tb}=2\text{dB}$ und bei 70dB schon fast $U_{tb}=6\text{dB}$

In der professionellen Messtechnik werden natürlich nicht die billigen SMA (kompatibel zu 3,5mm) Anschlüsse verwendet. Hier kommen PC3,5mm , 2,92mm(k) oder N Steckersysteme zum Einsatz. Dadurch ist auch die Anpassung an den Übergängen besser und selbst diese Stecker haben eine Grunddämpfungsfehler der auch noch frequenzabhängig ist. Bis 6 GHz kann man da mal ein Auge zudrücken.

Kalibrierung und Kalnormale:

Um eine Kalibrierung kommt man bei VNAs nicht herum. So werden auch Kabel und Adapter mit einbezogen. Dazu gibt es die Normale: Open, Short und Load. Warum gerade diese, wird an dem



Smith-Diagramm verständlich. Dieses bildet die komplexe Ebene durch eine konforme mathematische Transformation in einem Kreis ab. So einen Kreis kann man mit den drei Punkten einer Gerade in der Mitte (Load), am rechten Rand (Open) und am linken Rand (Short) beschreiben und skalieren.

In vielen Fällen ist diese Anschauung der Reflexion sehr hilfreich, da zum Beispiel Lastanpassungen direkt gut sichtbar werden.

Wie in der Geräteanleitung beschrieben, müssen in der vorgegeben Reihenfolge zuerst die Fehlerterme der Reflexion gemessen, dann die Isolation und schließlich der Durchgang für die Dämpfungsmessung.

Um eine genaue Fehlerberechnung durchzuführen, um dann die Messwerte zu korrigieren, müssen die Daten der Normale elektrisch genau beschrieben sein. So

werden im Profibereich der Open mit Kapazitätstermen, der Short mit Induktivitätstermen, die frequenzabhängig sind, beschrieben. Bei der Load sind die Reflexionswerte bekannt und sollten sehr klein sein. Ab 2 GHz wird die Reflexionskorrektur mit einer Gleitlast bei verschiedenen Stellungen durchgeführt. Die dann nach der Kalibrierung gewonnenen effektiven Systemdaten dienen dann zur Korrektur der Messung. Je nach Kalibriermethode kann dann zum Beispiel die Direktivität von 30dB bis auf 60dB verbessert werden. Ob hier die Kalibriernormale mit Daten im Gerät bekannt sind, ist fraglich. So ist auch kein Unterschied zwischen dem offenen Port1 und dem

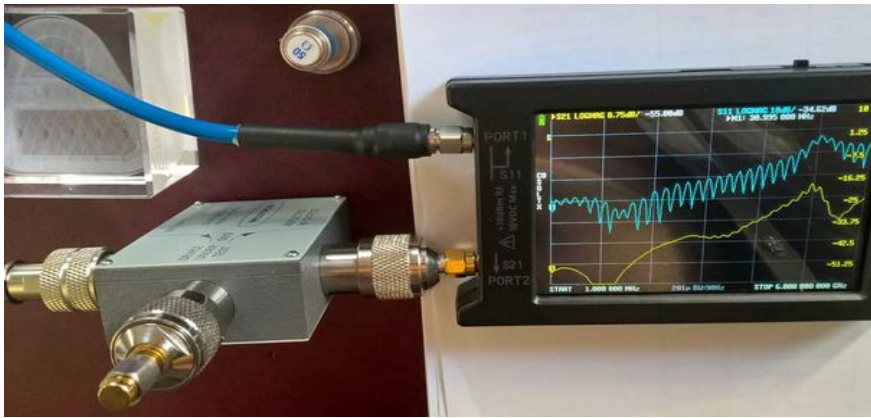
Lite VNA

angeschlossenen Open festzustellen. Man kann hier mit Adapter und den N-Normalen eine Kalibrierung durchführen und es werden keine anderen Normaldaten benötigt. Daher nehme ich an, daß mit idealisierten Daten gerechnet wird. Da für mich als Rentner kein HP8510 mehr zu Verfügung steht, ist auch keine Überprüfung möglich. Im Profibereich gibt es Verifikationsnormale mit allen Daten, um VNAs nach der Kalibrierung zu überprüfen. Bei HP sind das eine Luftleitung (50Ohm), eine Luftleitung (25Ohm-Sprung), ein 20dB und ein 50dB Dämpfungsglied. Die Luftleitungen sind ohne Stützen und halten den Innenleiter zwischen den Anschlüssen. So können Betrag und Phase überprüft werden.

Messergebnisse:

Ich habe nun verschieden Messungen bis 6GHz nur bei Beträgen durchgeführt um eine Messunsicherheitsbetrachtung zu machen. Die IF Bandbreite betrug immer 90Hz.

Für die Reflexion hatte ich N-Load-Normale, mit Werten bis 2,1 GHz und 18 GHz. Zusätzlich konnte ich mit einer Wiltron Messbücke (60NF50) bis 2,1 GHz mit einem Spektrumanalyzer und auch bis 3 GHz mit dem Lite-VNA messen. Dazu wurde die Brücke zwischen Port1 und Port2 geschaltet. Die Messunsicherheit der Brücke wird mit: $U_{mb}=0,01+0,09 \cdot r^2$ für r angegeben. Die



0,01 entsprechen der Direktivität von 40dB. Die Messungen mußten mit Adaptern N-SMA durchgeführt werden. Hierbei ist die Referenz der offene Messport an der Brücke und es gilt Wert = (DUT-Anzeige) - (Open-Anzeige). DUT = Device Under Test (Prüfling). Der VNA wird dabei nur als Generator und Messempfänger

verwendet. Dabei ist zum Beispiel die eigene Direktivität unbedeutend.

Zuvor hatte ich ohne eine Kalibrierung des VNA mit Anschluß der beigelegten SMA Kalibriernormale Open und Load an S11 gemessen. Bei Open lagen die Werte statt bei $\pm 0,04$ dB zwischen 0,01dB und 4,6dB und bei Load statt >-40 dB zwischen -45dB und -12dB. Das heißt die Direktivität der Hardware ist ziemlich schlecht und muß stark korrigiert werden. Das klappt auch ganz gut. Mit r_{DC} ist der Gleichstromwiderstand umgerechnet auf die Reflexion gemeint.

Mit der Brücke bis 2,1 GHz wurden für das VNA-N-Normal ($r_{DC}=0,002$) Werte zwischen 0,005 und 0,013 ermittelt. Für das VNA-SMA-Normal ($r_{DC}=0,009$) lagen die Werte zwischen 0,007 und 0,027. An Hand von Vergleichsmessungen liegt die Messunsicherheit zwischen 0,008 und 0,01; ansteigend mit der Frequenz. Wenn man mit dem VNA-N-Normal den VNA kalibriert sind die Abweichungen für mein N-Normal zwischen 0,005 und 0,01 bis 3 GHz und bis 6 GHz bei 0,02.

Man kann davon ausgehen, daß durch die Kalibrierung die effektive Direktivität bis zu 45dB (0,006) beträgt. Leider habe ich kein eigenes SMA Normal um die Ergebnisse zu überprüfen.

Für die Messunsicherheit der Reflexion einer N-Load würde ich daher folgende Angaben machen:

Frequenz	1MHz bis 2 GHz	2 GHz bis 3GHz	3 GHz bis 4 GHz	4 GHz bis 6 GHz
Reflexion (r)	0,008	0,012	0,018	0,025

Bei höheren Reflexionen gilt Gleichung 4. Im Fall der Load ist die Phase sehr unsicher (Gl.2).

Da die Messungen nur auf der N-Ebene betrachtet wurden und das SMA-Normal nur bis 3 GHz

Lite VNA

gute Werte hat, sind Messungen über 3 GHz mit SMA leider nicht wirklich überprüfbar. Für die Dämpfung konnte ich nur auf N-Normale zurückgreifen. Dazu wurde ein Adapter N (f) auf SMA (m) bei Port 1 und ein Kabel SMA(m) auf N(m) an Port 2 angeschlossen. Dieses Kabel wurde bei der Kalibrierung mit den N-Normalen verwendet.



Es wurde keine Reflexion bei den Dämpfungsgliedern gemessen. Da diese von Herstellern wie HP, R&S oder Weinschel sind, ist der Reflexionseinfluß gering. Bis 2,2 GHz konnten die Dämpfungswerte zuvor sehr genau bestimmt werden.

Über 2,2 GHz ist nur eine Annäherung der Dämpfungswerte auf Grund der unteren Werte und der üblichen Verläufe und Spezifikationen möglich. Alle Dämpfungsglieder sind bis mindestens 12 GHz spezifiziert. Die Abweichung des Nullwerts bis etwa 3 GHz liegt nach der Kalibrierung bei $\pm 0,03\text{dB}$. Ab 2 GHz waren die Kurven wellig. Es gab die folgenden Abweichungen bezogen auf den wahren Wert.

Abweichungen vom Wert:

dB / Frequenz	Uns. Wert	bis 2 GHz	bis 3 GHz	bis 6 GHz	Aufbau
6 dB	$\pm 0,06\text{ dB}$	-0,08 dB	-0,15 dB	+0,45 dB	x
10 dB	$\pm 0,06\text{ dB}$	-0,12 dB	-0,15 dB	+0,40 dB	x
20 dB	$\pm 0,07\text{ dB}$	+0,12 dB	-0,2 dB	-0,60 dB	x
30 dB	$\pm 0,10\text{ dB}$	-0,25 dB	-0,45 dB	-0,90 dB	x
40 dB	$\pm 0,12\text{ dB}$	-0,25 dB	-0,30 dB	-0,30 dB	10+30 dB
50 dB	$\pm 0,12\text{ dB}$	-0,40 dB	-0,55 dB	-0,55 dB	20+30 dB

Auf Grund der Abweichungen kann eine grobe Abschätzung für die Messungen angegeben werden. Die Abweichungen liegen zum Teil weit oberhalb der Messunsicherheit der Normale bis 2,2 GHz. So ist der Nullfehler schon 0,03dB groß.

Messunsicherheit incl. Null:

dB / Frequenz	Uns. Nullwert	bis 2 GHz	bis 3 GHz	bis 6 GHz	Spec. HP Att.
bis 10 dB	$\pm 0,04\text{ dB}$	$\pm 0,15\text{ dB}$	$\pm 0,18\text{ dB}$	$\pm 0,50\text{ dB}$	$\pm 0,4\text{ dB}$
bis 20 dB	$\pm 0,04\text{ dB}$	$\pm 0,16\text{ dB}$	$\pm 0,25\text{ dB}$	$\pm 0,70\text{ dB}$	$\pm 0,6\text{ dB}$
bis 40 dB	$\pm 0,04\text{ dB}$	$\pm 0,35\text{ dB}$	$\pm 0,40\text{ dB}$	$\pm 0,90\text{ dB}$	$\pm 1,0\text{ dB}$
bis 50 dB	$\pm 0,04\text{ dB}$	$\pm 0,60\text{ dB}$	$\pm 0,70\text{ dB}$	$\pm 0,95\text{ dB}$	x

Die Messunsicherheiten gelten bei kleinen Reflexionsfaktoren. Im oberen Frequenzbereich liegt die Messunsicherheit nahe bei den Spezifikationen der Hersteller für das Dämpfungsglied.

Für den kleinen Preis ist das Gerät auf jeden Fall bis 3 GHz erstaunlich gut und kann eingeschränkt auch bis 6,3 GHz verwendet werden.

Es werden die Betrachtungen weiterhin überprüft und gegebenenfalls verbessert.

IH©7.2026