
Fragen und Antworten
zum
Netzwerkanalysator
ZVR

Application Note 1EZ38_3D

Änderungen vorbehalten

19. 1. 1998, Olaf Ostwald

Produkte:

ZVR

ZVRE

ZVRL



ROHDE & SCHWARZ

INHALT	SEITE
FRAGEN UND ANTWORTEN...	
1-11 ...ZU DEN MEßEIGENSCHAFTEN	2
12-21 ...ZUR KALIBRIERUNG	6
22-28 ...ZU DEN VIRTUELLEN TRANSFORMATIONSNETZWERKEN	10
29 APPLIKATIONSSCHRIFTEN	14
30 BESTELLANGABEN	14

Fragen und Antworten...

...zu den Meßeigenschaften:

1. Kann man beim ZVR die Frequenzgrenzen, die Punkteanzahl oder die Meßbandbreite verändern ohne die Kalibrierung zu verlieren?

Ja. Bei den Netzwerkanalysatoren ZVR und ZVRL ist eine **Veränderung der Meßbandbreite (IFBW) jederzeit möglich** und hat keinen Einfluß auf die Gültigkeit der Kalibrierung, da weiterhin an genau denselben Frequenzstützpunkten gemessen wird an den auch kalibriert wurde. Die Gültigkeit der Kalibrierung wird durch die weiterhin aufleuchtende Zustandsanzeige „CAL“ signalisiert. Während der Kalibriermessungen wird übrigens die Meßbandbreite automatisch auf 1 kHz reduziert, wenn sie vorher größer eingestellt war. Dadurch wird der Einfluß von Rauschen reduziert, ohne die Geschwindigkeit der Kalibrierung zu beeinträchtigen. Nach Abschluß der Kalibriermessungen wird automatisch wieder auf die ursprüngliche Meßbandbreite zurückgeschaltet.

Eine **Veränderung der Frequenzgrenzen oder der Meßpunkteanzahl** hingegen bedeutet zu meist, daß der Analysator an anderen Frequenzpunkten mißt als an denen er kalibriert wurde. Dann **müssen die Kalibrierdaten interpoliert werden**, was der Benutzer dem Gerät durch Einschalten der Funktion „CAL INTERPOL“ erlaubt. Nun kann innerhalb des vorher kalibrierten Frequenzbereichs in einem beliebigen Teilbereich und mit beliebiger Meßpunkteanzahl kalibriert gemessen werden. Natürlich kann die Kali-

brierung nicht auf Bereiche außerhalb der Frequenzgrenzen des zuvor kalibrierten Bereiches extrapoliert werden. Zur Kennung der Kalibrierinterpolation ändert sich die Zustandsanzeige von „CAL“ auf „CAI“.

2. Wie groß ist die höchste Meßbandbreite?

Die höchste Meßbandbreite **beträgt 26,5 kHz**. Sie läßt sich über 10 kHz in halbdkadischen Stufen bis auf 1 Hz reduzieren. Nach „PRESET“ beträgt die Meßbandbreite 10 kHz und erlaubt so eine hohe Meßgeschwindigkeit. Selbst bei den hohen Meßbandbreiten beträgt die Meßdynamik mehr als 80 dB.

3. Wie sieht es mit Alterung und Temperaturdrift aus?

Die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Messungen ist eine Schlüsseleigenschaft jedes guten Netzwerkanalysators. Deshalb wurde bei der Entwicklung der Netzwerkanalysatoren der ZVR-Familie besonders darauf geachtet und es wurden einige Maßnahmen konzeptioneller, konstruktiver und elektrischer Art getroffen, um auftretende Temperaturdrift zu minimieren. Dazu gehören Belüftungs- und Luftleitmaßnahmen, die bei kritischen Baugruppen des Analysators, wie beispielsweise dem Frontend, für eine gleichartige Erwärmung aller Empfängerkanäle sorgen. Ferner werden die Streuparameter stets aus dem vektoriellen Verhältnis von Meßkanal- und Referenzkanalgrößen abgeleitet, wobei die HF-Verkabelung im Testset des Analysators so ausgelegt ist, daß Meß- und Referenzkanäle möglichst identische elektrische Längen aufweisen. Durch die Verhältnisbildung wird eine durch Temperaturdrift hervorgerufene Phasenänderung kompensiert. Ferner ist für die in den Reflexionsfaktormeßbrücken befindlichen Symmetrierübertrager jeweils im selben Gehäuse eine dünne koaxiale Kompensationsleitung für die Referenzkanäle eingefügt. Die in den beiden Meßbrücken verwendeten Koaxialkabel sowohl für die Symmetrierübertrager als auch für die Kompensationsleitungen stammen dabei aus demselben Kabelstück. Aus diesem Grund können übrigens die für ZVRE und ZVR erhältlichen Meßbrücken nur als Paar bestellt werden.

Darüber hinaus werden alle Geräte in der Fertigung einer ausführlichen **Voralterung** unterzogen, um weitere Drifteffekte zu minimieren. Diese Maßnahmen führen zu dem Ergebnis, daß für praktisch alle Anwendungen, bei denen sich der Meßaufbau nicht ändert, eine Kalibrierung nur einmal durchgeführt werden muß und diese in der Regel über Monate hinaus verwendet werden kann. Typische Werte für die **Stabilität** des Netzwerkanalysators beispielsweise nach Normierung, Ausschalten und vollständigem Abkühlen und wenige Minuten **nach Wiedereinschalten** des kalten Gerätes sind **<0,02 dB** beziehungsweise **<0,5°** bei Transmissionsmessungen. Für Reflexionsmessungen beträgt die **typische Stabilität der effektiven Direktivität >60 dB**. Bei höheren Anforderungen wird empfohlen, das Gerät eine gute Stunde warmlaufen zu lassen, wonach die typische Stabilität verglichen mit einer Kalibrierung vom Vortag und bei über Nacht ausgeschaltetem Gerät **<0,005 dB** beziehungsweise **<0,1°** beträgt. Für noch höhere Anforderungen an die Stabilität sollte der Netzwerkanalysator unter möglichst konstanten Umgebungsbedingungen in einem klimatisierten Raum betrieben werden und mindestens zwei Stunden warmgelaufen sein. Nur für allerhöchste Anforderungen ist es erforderlich, eine Kalibrierung unmittelbar vor der Messung durchzuführen, für alle anderen Anwendungen kann - bei unverändertem Meßaufbau - auf alte Kalibrierdatensätze zurückgegriffen werden.

4. Welche Möglichkeiten gibt es bis etwa 2 GHz, um Leiterplatten direkt zu kontaktieren?

Abhängig davon, ob man weiterhin im 50- Ω - oder 75- Ω -Leitungssystem messen möchte oder eine hochohmige Messung erforderlich ist, kommen unterschiedliche Lösungen in Frage. Für niederohmige Messungen an nur wenigen Schnittstellen sind **Meßadapter** gut geeignet, in die man die Leiterplatten hineinlegt. Die in der Regel planaren Anschlüsse der Leiterplatte, häufig Microstrip- oder koplanare Leitungen, werden bezüglich Innenleiter und Masse durch den Adapter kontaktiert und erlauben über einen Übergangsverbinder den koaxialen Anschluß des Netzwerkanalysators. Sind die Schnittstellen der Leiterplatten so nicht zugänglich, beispielsweise weil sie nicht am Rand der Platte sondern weniger gut zugänglich sich in ihrem Inneren befinden, kommen spezielle Prüfadapter in Frage, bei denen geeignet gestaltete **koaxiale Sonden** die Prüfpunkte kontaktieren.

Für hochohmige Messungen sind spezielle **HF-Tastköpfe**, sogenannte „High Impedance Probes“ erhältlich, die einen empfindlichen HF-Vorverstärker enthalten und prinzipiell mit beliebigen Punkten des Prüflings kontaktiert werden können. Vorteil ist hierbei, daß der Prüfling nahezu nicht belastet wird, also die Spannungsverhältnisse so gemessen werden, wie sie es ohne Anschluß des hochohmigen Tastkopfes auch sind. Die Betriebsspannung für den HF-Vorverstärker kann durch den Netzwerkanalysator zur Verfügung gestellt werden. Die Analysatoren der ZVR-Familie enthalten hierzu zwei Frontplattenbuchsen PROBE 1 und PROBE 2, an die handelsübliche HF-Tastköpfe angeschlossen werden können.

5. Kann der ZVR bis etwa 100 MHz auch erdsymmetrisch messen?

Dies hängt von dem zur Verfügung stehenden Meßadapter und vor allem dem **Symmetrierübertrager (Balun)** ab, der als externe Komponente benötigt wird, um anliegende erdsymmetrische Signale in erdunsymmetrische zu transformieren. Grundsätzlich sind dann alle Netzwerkanalysatoren der ZVR-Familie dazu in der Lage, auch erdsymmetrische Messungen über den vollen Frequenzbereich bis 4 GHz durchzuführen. Der in den internen Reflexionsfaktormessbrücken des Passiv-Testsets benutzte besonders breitbandige Symmetrierübertrager ist mit Hilfe von drei Ferritkreiskernpaaren aufgebaut und überstreicht den Frequenzbereich von 9 kHz bis 4 GHz. Symmetrierübertrager, beispielsweise für den **Frequenzbereich 10 kHz bis 125 MHz**, sind kommerziell erhältlich.

6. Lassen sich auch sehr kleine Impedanzen unter 1 Ω messen?

Ja, dazu genügt in der Regel bereits eine einfache Normierungskalibrierung, bei der man den Prüfling durch einen Kurzschluß ersetzt. Anschließend ist der Netzwerkanalysator aufgrund seiner guten Roheigenschaften (Meßtoranpassung) und seines thermisch besonders stabilen Aufbaus dazu in der Lage, auch Impedanzen, die sich nur wenig von 0 Ω unterscheiden, mit beeindruckender Genauigkeit zu messen. Ein **Miniaturwiderstand von 560 m Ω** wurde beispielsweise bis 100 MHz mit einer typischen **Ungenauigkeit von weniger als 40 m Ω** gemessen. Durch noch besser geeignete Kalibrierungen wie TRM läßt sich die Meßgenauigkeit noch weiter steigern.

Bei Messungen zu höheren Frequenzen hin ist es von großer Bedeutung, die elektrische Länge des Prüflings korrekt zu berücksichtigen, wenn die dadurch verursachten Phasenänderungen des Reflexionsfaktors, die einen Anstieg der Impedanz des Prüflings bewirken, vermieden werden sollen.

7. Um wieviel schneller ist der Netzwerkanalysator ZVR bei der Messung von Oberflächenwellenfiltern als andere Analysatoren?

Die Meßgeschwindigkeit wird bei jedem Netzwerkanalysator naturgemäß durch die gewählte Meßbandbreite (ZF-Bandbreite) beschränkt. Diese wird durch das ZF-Filter bestimmt, welches das im Empfänger zu niedrigen Frequenzen heruntergemischte Meßsignal filtert. Dieses ZF-Filter wird beim ZVR wie bei den meisten modernen Netzwerkanalysatoren mit Hilfe eines digitalen Signalprozessors realisiert. Je schmaler das gewählte ZF-Filter ist, umso geringer ist der Einfluß des Rauschens und umso höher ist die erreichbare Meßdynamik; umso länger ist jedoch auch die Meßzeit. Diese entspricht naturgemäß etwa der reziproken Meßbandbreite und zwar unabhängig von der Art der Realisierung des ZF-Filters, sei es analog oder digital. Geringfügig läßt sich die Meßgeschwindigkeit zu Lasten der Filtergüte beschleunigen, umgekehrt werden besonders steilflankige ZF-Filter mit hoher Sperrtiefe die Meßzeit verlängern.

Ein Vorteil der ZVR-Netzwerkanalysatoren ist, daß sie vergleichsweise höhere Meßbandbreiten gestatten. Die maximale ZF-Bandbreite „Full“ bei den Analysatoren der ZVR-Familie beträgt 26,5 kHz, welches verglichen mit den bei anderen Netzwerkanalysatoren maximal möglichen ZF-Bandbreite von nur 3 kHz und zusammen mit einer geringfügig stärker auf Meßgeschwindigkeit optimierten Filtercharakteristik der ZF-Filter beim ZVR zu einem Faktor etwas größer als 10 bei einem direkten Vergleich der Meßgeschwindigkeiten führt.

Darüber hinaus bietet der ZVR noch einen besonderen Meßmodus, den „Fast Mode“, mit eingeschränkter Dynamik und Meßgenauigkeit, in dem reduzierte Zeiten für das Einschwingen des internen Generators und des Empfängers berücksichtigt werden sowie die internen ZF-Verstärker vor den Analog-Digitalwandlern nicht umgeschaltet werden. Hierdurch wird eine weitere Beschleunigung

der Messung um etwa den Faktor 1,5 erreicht.

Beachtet werden muß jedoch immer die minimal nötige Einschwingzeit des Meßobjektes. So ist es beispielsweise nicht sinnvoll, ein schmalbandiges Quarzfilter mit höchster Meßgeschwindigkeit vermessen zu wollen, da es in der kurzen Zeit, in der das Stimulussignal dann nur anliegt, überhaupt nicht in der Lage ist einzuschwingen, was sich gelegentlich als ein „Kippen“ der Meßkurve beobachten läßt. Eine gewisse Abhilfe kann hier in einigen Fällen eine besondere Eigenschaft des ZVR bieten, nämlich zwei Messungen miteinander zu verknüpfen, eine bei der die Meßsignalfrequenz wie üblich von niedrigen zu hohen verändert wird (Vorwärtswobbelung) und eine zweite, bei der die Wobbelrichtung umgekehrt wird (Rückwärtswobbelung). Die Summe beider Messungen entspricht dann näherungsweise dem wahren Meßergebnis, welches man bei ausreichend langsamer Wobbelung erhalten würde.

Bei Oberflächenwellenfiltern sind diese Einschränkungen meist nicht zu beachten. Hier kann somit die volle Meßgeschwindigkeit des ZVR genutzt werden, die **in der schnellsten Betriebsart etwa um einen Faktor 15** höher ist als bei vergleichbaren Netzwerkanalysatoren.

8. Welche Möglichkeiten und Referenzen gibt es für Komponententests?

Eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung von Komponenten, die nicht über gängige koaxiale Schnittstellen verfügen, ist die **geeignete Adaptierung**. Hier gibt es etwa genauso viele Möglichkeiten und alternative Meßadapter wie es unterschiedliche Komponenten gibt. R&S unterstützt die Anwender bei der Auswahl der für die Komponententests gut geeigneten Adapter und des jeweils **optimalen Kalibrier- und Meßverfahrens** auf vielfältige Weise. So besteht auch die Möglichkeit, für die zu testenden Komponenten individuelle Adapter bei R&S herstellen zu lassen und auch geeignete Referenzen beziehungsweise Kalibrierstandards können kundenspezifisch aufgebaut werden. Viele Anwendungen lassen sich elegant durch das hierfür besonders gut geeignete und von R&S exklusiv angebotene Kalibrierverfahren TNA lösen, das für alle Vierkanal-Netzwerkanalysatoren ZVR bereits zum Lieferumfang gehört. Ferner bietet das neue und zum Patent angemeldete Verfahren „Virtual Embedding Networks“ ZVR-K9 auch für Kompo-

nententests die Möglichkeit, auf eventuell notwendige Anpaßnetzwerke, deren Herstellung, Wartung und Vielfalt häufig Probleme bereitet, hardwaremäßig gänzlich zu verzichten und sie stattdessen auf besonders elegante Weise im Rahmen der ohnehin durchzuführenden Systemfehlerkorrekturrechnungen nur rechnerisch zu realisieren (vgl. hierzu Fragenkomplex zu den Virtuellen Transformationsnetzwerken ab S. 10).

9. Wie können die Vorteile des VXI-Busses auch für DC-Steuerungen im System genutzt werden?

Die Netzwerkanalysatoren der ZVR-Familie sind **nicht dazu in der Lage**, Systemkomponenten über den VXI-Bus zu steuern. Auch umgekehrt kann der Netzwerkanalysator nicht über einen VXI-Bus angesteuert werden. Für Systemanwendungen aller Art wird die Verwendung des IEC-Busses empfohlen. Hierüber können selbstverständlich auch Gleichspannungsquellen, die ihrerseits IEC-Bus-tauglich sind, gesteuert werden.

Die ZVR-Netzwerkanalysatoren können optional bis zu **drei unabhängige IEC-Bus-Schnittstellen** enthalten, wobei die erste standardmäßig für universelle Anwendungen vorgesehen ist. Die zweite, der sogenannte „System Bus“, ist speziell für die schnelle Ansteuerung von externen Generatoren vorgesehen, die beispielsweise bei Frequenzumsetzenden Messungen als Lokaloszillatoren benötigt werden, wobei der ZVR selbst als „System Controller“ agiert. Die dritte (optionale) IEC-Bus-Schnittstelle dient in Zusammenhang mit der Option Rechnerfunktion ZVR-B15 zur Steuerung von beliebigen Meßplätzen, die durch den im ZVR enthaltenen PC-kompatiblen Rechner gesteuert werden.

10. Was passiert im Dreitor-Betrieb mit dem offenen Pfad?

Bei Verwendung der Option Dreitor-Adapter ZVR-B8 wird das Meßtor PORT1 des Netzwerkanalysators mit Hilfe eines elektronischen FET-Umschalters (SPDT) auf zwei Meßtore, nämlich PORT1 und PORT3 erweitert. Damit können sieben der insgesamt neun Streuparameter eines beliebigen Dreitors direkt gemessen werden, wobei durch den Netzwerkanalysator gesteuert abwechselnd der Pfad von PORT1 zu PORT2 oder der Pfad von PORT3 zu PORT 2 durchgeschaltet wird. Für den jeweils offenen Pfad wird das dann nicht benutzte PORT durch einen in den Dreitor-Adapter integrierten 50- Ω -Widerstand **reflexionsarm abgeschlossen**.

Zur Thematik Dreitormessungen sind die Applikationsschriften „3-Port Measurements“ (1EZ26_0E) und „Mehrtormessungen“ (1EZ37_0D) erhältlich.

11. Können auch Viertore vermessen werden?

Hierzu gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine direkte Lösung bietet die Verwendung des optionalen Viertor-Adapters ZVR-B14. Dieser enthält zwei elektronische Umschalter und erweitert so die beiden Meßtore PORT1 und PORT2 des Netzwerkanalysators auf insgesamt vier Meßtore PORT1 bis PORT4. Diese werden paarweise in Abhängigkeit vom jeweils aktiven Darstellkanal des Netzwerkanalysators aktiviert, so daß unterschiedliche Transmissionen und alle Reflexionen eines Viertor-Meßobjektes bestimmt werden können.

Der Viertor-Adapter ist in zwei verschiedenen Modellvarianten erhältlich, nämlich .02 und .03. Die erste enthält zwei Eins-auf-Zwei-Umschalter (2 x SPDT) und ist daher speziell für Meßobjekte mit zwei Ein- und zwei Ausgängen wie Richtkoppeler oder doppelpolige Umschalter (DPDT) geeignet. Hiermit können die folgenden S-Parameter des Meßobjektes bestimmt werden: **S11, S22, S33, S44, S21, S12, S32, S23, S41, S14, S43 und S34**.

Die zweite Variante hingegen enthält einen Eins-auf-Drei-Umschalter (SP3T) und eignet sich besser für Meßobjekte mit einem Eingang und drei Ausgängen oder umgekehrt, wie beispielsweise Filterbänke oder Leistungsverteiler. Sie erlaubt die Messung der folgenden Viertor-Streuparameter: **S11, S22, S33, S44, S21, S12, S31, S13, S41 und S14**.

Detaillierte Informationen hierzu gibt die Applikationsschrift „Mehrtormessungen“ (1EZ37_0D).

Als eine alternative Lösung können auch zwei Dreitor-Adapter ZVR-B8 mit Hilfe eines einfachen „Y-Kabels“ an der optionalen Rückwandbuchse „MULTI-PORT ADAPTER“ gemeinsam betrieben werden und so sowohl das PORT1 als auch das PORT2 des Netzwerkanalysators auf jeweils zwei Meßtore erweitert werden. Der zweite Dreitor-Adapter wird so konfiguriert, daß er nicht wie üblich synchron zu den geraden oder ungeraden Darstellkanälen umschaltet sondern für die Darstellkanäle CH1 und CH2 sich in Stellung PORT1 befindet und für die Darstellkanäle CH3 und CH4 in Stellung PORT3. Das Viertor-Meßobjekt wird

an die nun vier verfügbaren Ports angeschlossen. Je nach Wahl der verwendeten Darstellkanäle CH1 bis CH4 können nun wie bei Verwendung des Viertor-Adapters Variante .02 neben den Transmissionsstreuparametern **S21** und **S12** und allen Reflexionen **S11 bis S44** zusätzlich noch die folgenden **Streuparameter des Viertors** gemessen werden: **S31, S13, S32, S23, S41, S14, S42 und S24**.

Auch hierzu gibt die erwähnte Applikationsschrift „Mehrtormessungen“ (1EZ37_0D) weiterführende Informationen.

Eine andere Möglichkeit für Viertormessungen besteht in der Option Zusatzeingänge Viertor ZVR-B26. Dabei werden die beiden optionalen Eingänge INPUT b1 und INPUT b2 zu zwei zusätzlichen Meßstoren PORT3 und PORT4 umfunktioniert, die dann die beiden Meßstore PORT1 und PORT2 ergänzen. Zwei in das Testset eingebaute zusätzliche elektronische Umschalter bewirken, daß zwischen allen vier Ports sehr schnell umgeschaltet werden kann. Diese Konfiguration ermöglicht die Messung der **Viertor-Streuparameter S11, S22, S21, S12, S31, S32, S41 und S42**, ohne daß hierzu Dreitor- oder Viertor-Adapter vorgeschaltet werden müßten. Näheres zu dieser Lösung enthalten die Applikationsschriften „4-Port Measurements“ (1EZ25_0E) und „Mehrtormessungen“ (1EZ37_0D).

...zur Kalibrierung:

12. Gilt die volle Systemfehlerkorrektur auch bei Viertor-Messungen?

Die in den Analysatoren der ZVR-Familie implementierten mathematischen Verfahren zur Systemfehlerkorrektur umfassen nur Eintor- und Zweitormodelle. Diese basieren auf unterschiedlichen, teilweise vereinfachten Modellen (Normalisierung, „One Path Two Port“, TOSM, TOM, TNA, etc.) bis hin zum „Vollmodell“ (TOM-X), das sämtliche zwischen den beiden Meßkanälen und den Referenzkanälen auftretende Verkopplungen vollständig erfassen und eliminieren kann.

Solche vollständigen Modelle sind aufgrund des immensen numerischen Aufwandes **für Dreitor- und Viertor-Messungen** zur Zeit **nicht** implementiert. Stattdessen wird mit vereinfachten Modellen gearbeitet. Bei Dreitormessungen wird beispielsweise für jeden der beiden unterschiedlichen verfügbaren Pfade, nämlich PORT1 zu PORT2 und PORT3 zu PORT2, unabhängig voneinander eine vollständige Zweitorkalibrierung durchgeführt.

Bei Viertormessungen mit zwei Dreitor-Adaptoren ZVR-B8 oder einem Viertor-Adapter ZVR-B14 kann man bis zu vier voneinander unabhängige Zweitorkalibrierungen durchführen. Mißt man Viertore mit Hilfe der Option Zusatzeingänge Viertor ZVR-B26, so erfolgt eine vollständige Zweitorkalibrierung nur für PORT1 und PORT2, während man sich für die Pfade zu PORT3 und PORT4 mit einer einfachen Normierungskalibrierung begnügt.

13. Verliert das Gerät nach dem Ausschalten seine Kalibrierung?

Nein, die **Kalibrierdaten werden** nach Durchführung einer Kalibrierung automatisch auf der internen Festplatte **gespeichert und sind nach dem Wiedereinschalten des Gerätes unmittelbar aktiv**. Der Benutzer kann darüber hinaus beliebige Kalibrierdatensätze auf der Festplatte oder auf Disketten explizit ablegen, um sie entsprechend seinen unterschiedlichen Meßaufbauten später gezielt wiederzuverwenden. Die Anzahl der Kalibrierdatensätze ist außer durch den verfügbaren freien Speicherplatz nicht beschränkt.

14. Kann man auch einen Prüfling zum Kalibrieren verwenden?

Es ist möglich, einen Prüfling als Ersatz für einen Kalibrierstandard zur Normalisierung des Meßplatzes zu benutzen. Die weiteren Prüflinge werden anschließend bezüglich ihrer Eigenschaften mit diesem als Bezug benutzten sogenannten **„Golden Device“** verglichen. Diese Vorgehensweise entspricht einer Normierungskalibrierung, beispielsweise „Transmission Normalization“ mit einer Durchverbindung, die über das CAL-Menü des Netzwerkanalysators verfügbar ist. Für eine Bestimmung der Identität zweier Prüflinge ist diese Methode gut geeignet; aufgrund der nicht spezifizierten Meßgenauigkeit sollte man sie jedoch nicht zur genauen quantitativen Messung der Unterschiede zweier Meßobjekte benutzen.

15. Gibt es einen Modellversuch hierzu?

Messungen, bei denen ein Meßobjekt in Bezug auf ein Referenz-Meßobjekt („Golden Device“) untersucht und verglichen wurde, sind schon **häufiger und ohne Probleme** mit dem ZVR durchgeführt worden. Dazu schließt man zunächst das als Referenz dienende Meßobjekt, beispielsweise ein Bandpaßfilter, an und schließt danach an dieselben Klemmen ein zu untersuchendes oder noch abzugleichendes Filter an. Auf diese Weise lassen sich die Eigenschaften beider Meßobjekte miteinander vergleichen. Eine interessante Variante hierzu ist die Verwendung von zwei synchron geschalteten Dreitor-Adaptoren ZVR-B8 oder eines Viertor-Adapters ZVR-B14. So können Referenz-Meßobjekt und Prüfling zeitlich parallel untersucht und verglichen werden, was auch den Vergleich von Temperatur- und Drift-Effekten vereinfacht.

16. Warum erhalte ich nach Kalibrierung bei Wiederanschließen des Leerlauf- oder Kurzschlußstandards als Meßkurve keinen Punkt im Smith-Diagramm?

Tatsächlich stellt der kalibrierte Netzwerkanalysator bei Messung beispielsweise des **Kurzschlußstandards (SHORT)** nicht, wie man erwarten könnte, als Meßkurve den Kurzschlußpunkt ($r = -1$) des Smith-Diagrammes dar. Stattdessen erkennt man eine Meßkurve, die bei niedrigen Frequenzen im Kurzschlußpunkt beginnt, für höhere Frequenzen jedoch entlang des Außenkreises des Smith-Diagramms entlangläuft und dabei, von 180° ausgehend, Phasenwerte bis beispielsweise 35° bei 4 GHz durchläuft und somit sogar bis in die Nähe des Leerlaufpunktes ($r = +1$) gelangt.

Dieses Verhalten ist jedoch völlig korrekt und in der **elektrischen Länge** des Kurzschlußstandards begründet. Aus konstruktiven Gründen befindet sich nämlich im allgemeinen die Kurzschlußebene nicht in der Referenzebene, die durch die Stoßkante des Außenleiters definiert ist, sondern beispielsweise bei den Standards des Kalibriersatzes ZV-Z21 um 15,1 mm dahinter. Da der Netzwerkanalysator den Reflexionsfaktor bezogen auf die Referenzebene mißt und anzeigt, wird konsequenterweise der korrekte Reflexionsfaktor des Kurzschlußstandards angezeigt, der sich durch Transformation seiner Kurzschlußebene über eine 15,1 mm vorgeschaltete Leitung ergibt. Mißt man statt des Kalibrierkurzschlusses als Meßobjekt einen anderen Kurzschluß mit einer anderen elektrischen Länge zwischen seiner

Kurzschlußebene und der Referenzebene, so zeigt der Analysator, so wie man es von einem korrekt messendem Netzwerkanalysator erwarten darf, dessen Reflexionsfaktor korrekt an. Bei großer Länge zwischen Kurzschluß- und Referenzebene wird dabei auch der Leerlaufpunkt durchlaufen. Dies ist genau bei der Frequenz der Fall, bei der die elektrische Länge des Standards ein Viertel der Wellenlänge beträgt (Lambda-Viertel-Transformation). Im Fall der Länge Null des Standards hingegen erhält man breitbandig dann tatsächlich als Meßkurve den erwarteten Punkt im Kurzschlußpunkt des Smith-Diagramms.

Da üblicherweise solch ein Kurzschluß der Länge Null nicht zur Verfügung steht (eine Ausnahme ist die Kurzschlußbuchse SHORT (F) des Kalibriersatzes ZCAN), ergibt sich daher gewöhnlich als Meßkurve kein Punkt sondern ein Kreisbogen, dessen Länge sich aus dem Produkt der Weite des Frequenzbereichs (SPAN) und der elektrischen Länge des Kalibrierstandards (LENGTH) bestimmt.

Mit Hilfe der Bedienfunktion OFFSET läßt sich die Lage der Referenzebene nach der Kalibrierung rechnerisch verschieben. Wählt man als Versatz genau die Länge des Standards, also im Beispiel 15,1 mm (ELECTRICAL LENGTH), so zeigt der Netzwerkanalysator die gemessene Phase in der Kurzschlußebene des Standards an. Diese beträgt genau 180° und die Meßkurve liegt dann im Kurzschlußpunkt des Smith-Diagramms.

Bei den **Leerlaufstandards (OPEN)** sind die Verhältnisse ähnlich, es kommt jedoch noch ein weiterer Effekt hinzu, nämlich die Streukapazität des leerlaufenden Leitungsendes. Im Gegensatz zu den Kurzschlußstandards, die (mit Ausnahme der einfach zu berücksichtigenden elektrischen Länge) praktisch ideal hergestellt werden können, weisen Leerlaufstandards eine nicht zu vernachlässigende Streukapazität des offenen Leitungsendes auf, die in der Größenordnung von einigen zehn Femtofarad liegt und außerdem frequenzabhängig ist. Die Streukapazität der beim ZVR verwendeten Kalibrierstandards ist sehr genau bekannt und wird während der Kalibrierung berücksichtigt, so daß keine zusätzlichen Meßunsicherheiten befürchtet werden müssen. Beim Vermessen eines Leerlaufstandards als Meßobjekt bewirkt seine Streukapazität jedoch eine zusätzliche Phasenverschiebung, die zur Folge hat, daß auch nach rechnerischer Korrektur seiner elektrischen

Länge (OFFSET) die Meßkurve nicht exakt mit dem Leerlaufpunkt zur Deckung kommt. Dies bedeutet jedoch nicht eine ungenaue Messung durch den Netzwerkanalysator, sondern ist vielmehr das korrekte Abbild der physikalisch wirklich vorhandenen Streukapazität des Leerlaufs. Könnte man einen perfekten Leerlauf aufbauen, dessen Reflexionsfaktor breitbandig exakt +1 wäre, also vom Betrag 1 und mit der Phase 0°, so würde der Analysator bei Anschluß solch eines Standards - und nur dann - als Meßkurve einen Punkt im Leerlaufpunkt (am rechten Rand des Einheitskreises des Smith-Diagramms) messen.

17. Wie häufig soll für Fertigungsanwendungen eine Neukalibrierung durchgeführt werden?

Die Beantwortung dieser Frage hängt einerseits von der Stabilität des Netzwerkanalysators selbst (vgl. Frage 3 zur Alterung und Temperaturdrift), aber andererseits auch von der Stabilität des dazugehörigen anwenderspezifischen Meßaufbaus sowie schließlich von den in der konkreten Anwendung geforderten Meßgenauigkeit ab. Für viele Anwendungen bei denen direkt oder über nur kurze Meßkabel (z.B. ZV-Z11) an den Meßstoren (PORT) des Netzwerkanalysators und mit nur moderaten Genauigkeitsanforderungen gemessen wird, muß der Netzwerkanalysator **niemals kalibriert werden**. In seinem „unkalibrierten“ Zustand, der durch eine verloschene Anzeige „CAL“ signalisiert wird, wird nämlich auf eine im Fertigungswerk durchgeführte sogenannte „Factory Cal“ zurückgegriffen, bei der eine TOM-Kalibrierung (bei ZVR) direkt zwischen PORT1 und dem Ende eines an PORT2 angeschlossenen Meßkabels ZV-Z11 durchgeführt wurde. Aufgrund der exzellenten Stabilität des Analysators genügt diese „Factory Cal“ für viele Anwendungen völlig aus.

Hat der Anwender jedoch einen davon stark abweichenden, umfangreicheren Meßaufbau, beispielsweise mit Übergängen, Adaptern oder langen Kabeln, der womöglich noch frequenz- oder gar temperatur- oder zeitabhängige Komponenten enthält, so ist eine **Kalibrierung des Meßaufbaus unumgänglich**. Der Netzwerkanalysator ZVR bietet hierzu eine reichhaltige Palette von unterschiedlichen, teilweise weltweit neuen und exklusiven Kalibriermethoden an, die verschiedene Vorteile aufweisen (hierzu: „Die ZVR-Familie“ in Elektronik-Praxis Nr. 3/96 vom 9.2.96, S. 116-119).

Ist der externe Meßaufbau stabil, so kann die mit dem ZVR einmal durchgeführte Kalibrierung über Monate hinweg benutzt werden, wenn die typischen Genauigkeitsanforderungen in der Größenordnung von wenigen Zehntel Dezibel und einigen wenigen Grad liegen, wobei die Betriebstemperatur des Gerätes von Bedeutung ist. Wird es im warmen Zustand kalibriert und dann über Nacht ausgeschaltet, so erhält man für das kalte Gerät direkt nach dem Einschalten eine Abweichung von typisch 0,05 dB beziehungsweise 2°, die dann mit der Zeit kontinuierlich abnimmt und nach gut einer Stunde, wenn das Gerät nahezu thermisch eingeschwungen ist, noch typisch 0,005 dB und 0,1° beträgt. Für Anwendungen, bei denen diese Stabilität hinreicht, muß in der Regel nur bei einer Veränderung des Meßaufbaus neu kalibriert werden. Ansonsten können abgespeicherte Kalibrierdatensätze über Monate hinaus verwendet werden.

Für höhere Anforderungen sollte der Netzwerkanalysator unter möglichst konstanten Umgebungsbedingungen in einem klimatisierten Raum betrieben werden und mindestens zwei Stunden warmgelaufen sein. Nur für allerhöchste Anforderungen ist es erforderlich, eine **Kalibrierung unmittelbar vor jeder Messung** durchzuführen.

18. Kann man mit einer 50-Ω-Leitung verifizieren?

Ja. Eine wohlbekannte **50-Ω-Leitung ist einer der besten Standards**, die man zur **Verifikation** der Meßgenauigkeit eines Netzwerkanalysators verwenden kann. Für koaxiale Leitungssysteme benutzt man sogenannte Luftleitungen. Dies sind sehr präzise gefertigte Koaxialleitungen, die keinerlei dielektrische Stützen enthalten. Über die gesamte Länge der Luftleitung befindet sich zwischen dem Innenleiter und dem Außenleiter nur Luft, was zu einer theoretisch sehr genau beschreibbaren Feldverteilung und somit zu einem genau vorhersagbaren Wellenwiderstand führt. Eine typische 50-Ω-Luftleitung in N-Technik beispielsweise weist einen Außenleiter mit nominell genau 7 mm Durchmesser und einen Innenleiter mit 3,0396 mm auf, wobei die Fertigungstoleranzen bei etwa 2 µm liegen. Einfluß auf die Genauigkeit des Wellenwiderstandes haben neben den mechanischen Abmessungen und Abweichungen von der idealen Zylinderform der Koaxialrohre noch ihre Exzentrizität sowie die aufgrund des Skineffektes frequenzabhängige Eindringtiefe des Feldes, die eine effektive Durchmesservergrößerung der Leitung bewirkt, und die Rauigkeit der

Leiteroberflächen. Bei der Darstellung des Leitungswellenwiderstandes erreicht man in der Praxis eine Genauigkeit von bis zu $0,1 \Omega$, woraus Reflexionsdämpfungen zwischen 50 dB und 60 dB folgen.

Zur Verifikation einer wichtigen Systemeigenschaft des Netzwerkanalysators, beispielsweise seiner Meßtoranpassung („Source Match“), wählt man als zu messenden Streuparameter S11 und schließt die Luftleitung an das Meßtor PORT1 des Netzwerkanalysators an, wobei ein Kurzschluß am anderen Ende der Luftleitung Totalreflexion bewirkt. Ein perfekter Netzwerkanalysator muß nun breitbandig als Reflexionsdämpfung genau 0 dB messen. Dabei ist die geringe Dämpfung der Luftleitung vernachlässigt. Aufgrund der nur endlich guten Meßtoranpassung des realen Netzwerkanalysators empfängt dieser jedoch nicht das gesamte vom Kurzschluß reflektierte Signal sondern ein gewisser Anteil, beispielsweise 10%, wird vom Meßtor über die Luftleitung zum Kurzschluß zurückreflektiert. Von dort aus gelangt es erneut zum Meßtor zurück und überlagert sich dort dem direkten Signal. Unter Vernachlässigung von weiteren Mehrfachreflexionen überlagern sich somit im Empfänger des Analysators zwei Signale, von denen das erste näherungsweise den richtigen Betrag von 1 aufweist und das zweite aufgrund des angenommenen Reflexionsfaktors des Meßtors von 10% etwa 0,1 beträgt. Diese beiden Signale überlagern sich nicht skalar sondern vektoriell, wobei die Phase des zweiten Signals sich gegenüber der Phase des ersten Signals aufgrund der Länge der Luftleitung (typisch 300 mm) frequenzabhängig ändert. In Abhängigkeit von der Frequenz erhält man so als Extremfälle abwechselnd eine Addition und Subtraktion der beiden Signale, was sich bei einer linearen Betragsdarstellung der Meßkurve als Welligkeit von $\pm 10\%$ darstellt. Die Welligkeit der Meßkurve entspricht somit direkt der zu verifizierenden Systemeigenschaft des Netzwerkanalysators: der Meßtoranpassung.

Diese Methode läßt sich auch zur Verifikation der nach Systemfehlerkalibrierung erreichten sogenannten **effektiven Meßtoranpassung** in gleicher Weise benutzen. Für die Analysatoren der ZVR-Familie ermittelt man dann Werte in der Größenordnung von 1% entsprechend 40 dB.

19. Wie wird im Dreitor-Betrieb kalibriert?

Die Option Dreitor-Adapter ZVR-B8 wird über eine Rückwandbuchse vom Analysator so gesteuert, daß für die beiden ungeraden Darstellkanäle, also CH1 und CH3 der Pfad von PORT1 zu PORT2 durchgeschaltet ist und für die beiden geraden Darstellkanäle der Pfad von PORT3 zu PORT2 durchgeschaltet ist. Die Dreitor-Kalibrierung führt man **nacheinander als zwei voneinander unabhängige Zweitor-Kalibrierungen** für jeden dieser beiden Pfade durch. Beispielsweise kalibriert man nach einer beliebigen Kalibriermethode, zum Beispiel TOM, bei aktivem Darstellkanal CH1 erst zwischen PORT1 und PORT2 und dann bei aktivem Darstellkanal CH2 zwischen PORT3 und PORT2.

Schließt man nun das Dreitor-Meßobjekt an und stellt im Anzeigemodus DUAL CHANNEL SPLIT in beiden Darstellkanälen CH1 und CH2 den Streuparameter S21 dar, so wird aufgrund der erläuterten Ansteuerung des Dreitor-Adapters im CH1 der Streuparameter S21 des Dreitors gemessen und im CH2 sein Streuparameter S23.

20. Läßt sich das automatische Kalibrierverfahren AutoKal auch mit einem Adapter für planare Kontaktierungen verwenden?

Ja. Alle Kalibrierverfahren dienen zur Steigerung der Meßgenauigkeit des kompletten Netzwerkanalysesystems. Hiermit ist der Netzwerkanalysator, beispielsweise ein ZVR, zusammen mit der Verkabelung, den Adaptern und möglicherweise weiteren zum Meßaufbau gehörenden Komponenten gemeint. Durch die Kalibrierung legt man auch die Bezugsebenen fest, bezüglich derer zukünftig die komplexen Streuparameter der Meßobjekte vektoriell gemessen werden sollen. Dies ist unabhängig davon, ob in koaxialer oder planarer Umgebung kalibriert wird. Entscheidend ist immer, daß die benötigten Kalibrierstandards, wie auch das Meßobjekt später, reproduzierbar stabil und qualitativ gut kontaktiert werden können und die Kalibrierstandards die benötigten Eigenschaften aufweisen. Hierbei unterscheidet sich das automatische Kalibrierverfahren AutoKal nicht von den anderen Kalibriermethoden. Ein Unterschied und gleichzeitig ein Vorteil des AutoKal-Verfahrens ist, daß eine vollständige Zweitor-Kalibrierung möglich ist, wobei nur ein einziger Kalibrierstandard, nämlich eine Durchverbindung T, benötigt wird. Allerdings ist auch für AutoKal einmalig vorab eine sogenannte Grundkalibrierung (Fundamental Cal) erforderlich, die dazu dient, die Eigenschaften der Transferstandards der Kalibriereinrichtung zu erfassen. Hierzu wird

das Verfahren TOM benutzt, welches neben der Durchverbindung T noch einen Leerlauf O und einen Abschluß M benötigt. Die Beantwortung der Frage bezüglich der Verwendbarkeit von AutoKal ergibt sich nun aus der Verfügbarkeit dieser Kalibrierstandards in planarer Form. Grundsätzlich ist auch eine Verknüpfung von AutoKal mit dem Kalibrierverfahren TNA als Grundkalibrierung möglich. Dann wird AutoKal sicher für nahezu alle planaren Anwendungen verwendbar sein. Dies ist zur Zeit zwar noch nicht beim ZVR implementiert, kann aber, wenn der Wunsch besteht, so realisiert werden.

21. Läßt sich die Gehäusekapazität C_0 eines Eintorresonators durch TOM-X herauskalibrieren?

Ja, dazu sollte man die Kalibrierstandards in Leergehäuse des Resonators, beispielsweise in leere Gehäuse eines Schwingquarzes, einbauen. Entscheidend ist eine gute Reproduzierbarkeit, also Gleichheit der Gehäusekapazitäten sowohl bei den Kalibriermessungen als auch bei den Objektmessungen. Wird dies hinreichend gut erreicht, so erkennt das Kalibrierverfahren TOM-X, welches speziell für die rechnerische Eliminierung von Übersprechern ($X = \text{“Crosstalk“}$) geeignet ist, die Gehäusekapazität als einen Teil der Verursachung des Übersprechens. Ist dies sowohl bei den Kalibriermessungen als auch bei den Objektmessungen konstant und nicht vom Meßobjekt abhängig, wird die **Gehäusekapazität C_0** aufgrund des **beim TOM-X-Kalibrierverfahrens** verwendeten „Vollmodells“ **besonders effizient eliminiert**.

...zu den Virtuellen Transformationsnetzwerken:

22. Was heißt: Messen in „kunden-spezifischer Umgebung“?

Die Option ZVR-K9 Virtual Embedding Networks ermöglicht es, **eine beliebige kundenspezifische Schaltungsumgebung**, beispielsweise ein Anpaßnetzwerk oder eine Leiterplatte, auf der man den Prüfling später einsetzen will, „virtuell“ in den Adapter des Prüfautomaten **zu integrieren**.

Auf diese Weise kann die Funktion eines Gesamtmoduls geprüft werden, welches vielleicht nur theoretisch bekannt ist und noch gar nicht existiert, während wirklich nur ein kritisches

Bauteil gemessen wird. So kann in früher Phase einer Entwicklung bereits eine Gesamtfunktionskontrolle erfolgen und die Einsatzfähigkeit eines Bauelementes in seiner späteren Umgebung garantiert werden. Darüber hinaus kann bei einer später eventuell notwendigen Bauteileänderung auf der Leiterplatte sofort das Zusammenspiel mit dem Prüfling überprüft werden und so ein möglicher hoher Ausschuß bei der Fertigung vermieden werden.

23. Woher werden die Daten für das Virtuelle Transformationsnetzwerk geliefert?

Das Virtuelle Transformationsnetzwerk kann einerseits **direkt durch Streuparametermessungen** ermittelt werden, wenn beispielsweise ein Anpassungstransformator bereits wirklich existiert und mit Hilfe der Option ZVR-K9 später durch den Virtuellen Transformator ersetzt werden soll. Eine andere Möglichkeit besteht darin, ein beliebiges Netzwerk **mittels eines Simulationsprogramms zu synthetisieren** und anschließend seine Streuparameter in den Netzwerkanalysator zu übernehmen und damit das Virtuelle Netzwerk zu implementieren.

Das neue Kalibrierverfahren TNA (R&S-Patent) macht die Implementierung und Anwendung von Virtuellen Netzwerken speziell auch für planare Schaltungsumgebungen geeignet, wo konventionelle Kalibrierverfahren oft versagen. Diese benötigen nämlich Kalibrierstandards mit genauen und wohlbekannten Eigenschaften, die sich in der Praxis häufig nicht mit ausreichender Qualität herstellen lassen. Das TNA-Verfahren hingegen stellt nur geringe Anforderungen an die Eigenschaften der Kalibrierstandards. Es erlaubt nahezu beliebige und unbekannte Kalibrierstandards und ermöglicht so eine präzise Kalibrierung sowohl innerhalb des Meßadapters in der Referenzebene des Prüflings als auch an seinen coaxialen Schnittstellen. So können überdies auch die Netzwerke zwischen diesen Schnittstellen ermittelt und eingerechnet werden oder umgekehrt dieses Netzwerk als Differenznetzwerk rechnerisch eliminiert werden.

24. Wie gewährleistet man, daß die TNA-Standards den gewünschten Wellenwiderstand darstellen?

Das TNA-Kalibrierverfahren stellt im Gegensatz zu den anderen Kalibriermethoden die geringsten Anforderungen bezüglich der Kenntnis der Eigenschaften der Kalibrierstandards; einige wenige charakteristische Eigenschaften dieser Standards jedoch müssen möglichst genau bekannt sein beziehungsweise dargestellt werden. Zum einen ist dies die elektrische Länge der Durchverbindung T („Thru“), durch die die Bezugsebene für Phasenmessungen in Reflexion und Transmission festgelegt wird. Zum anderen muß der beidseitige Eingangswiderstand des A-Standards („Attenuator“) und der Wellenwiderstand der Durchverbindungsleitung T möglichst gleich groß sein, da durch beide gemeinsam der Bezugswellenwiderstand festgelegt wird. Weichen diese voneinander ab oder entspricht einer oder beide nicht dem gewünschten Bezugswellenwiderstand, so treten Meßfehler auf, die sich durch eine reduzierte effektive Direktivität des Meßplatzes beschreiben lassen.

Bei koaxialen Meßaufbauten ist diese Problematik natürlich einfach zu beherrschen; hierbei wird man allerdings auch kaum auf das TNA-Verfahren zurückgreifen. Interessanter ist seine Anwendung bei planaren Strukturen beispielsweise mit Microstrip-Leitungen. Hierbei **dimensioniert** man sinnvollerweise den Durchverbindungsstandard T **nach den gleichen Regeln** nach denen man auch die Leitungen berechnet, die den Prüfling später in der realen Schaltung umgeben. Damit ist der **Wellenwiderstand „per Definition“ perfekt**. Auch auftretende Dispersion stört nicht, sondern es ist im Gegenteil erwünscht, daß der Durchverbindungsstandard möglichst genau die gleiche Dispersion zeigt wie die spätere Umgebung des Prüflings, an die er ja in der Regel reflexionsarm angepaßt werden soll.

Zusätzlich ist darauf zu achten, daß die Impedanz des A-Standards so genau wie benötigt mit dem Wellenwiderstand des T-Standards übereinstimmt, wobei dies von der Realisierungsart des Ersteren abhängt. Man kann ihn beispielsweise entweder mit Hilfe zweier konzentrierter Widerstände aufbauen, wobei diese im Gegensatz zur Leitung nahezu keine Dispersion aufweisen werden, oder ihn wie den T-Standard als Leitung ausbilden, die beispielsweise mit einem „getaper-ten“ Dämpfungsgummi bedämpft wird.

25. Sind die TNA-Standards rückführbar?

Diese Frage kann auf die beiden Standards T („Thru“) und A („Attenuator“) beschränkt werden, da an den Standard N („Network“) bis auf seine Reflexionssymmetrie keinerlei Forderungen gestellt werden und er meist einfach durch Offenlassen der Meßklemmen, also schlichtes Weglassen des Meßobjektes realisiert wird. Die entscheidenden Eigenschaften der beiden Standards T und A sind im Zusammenhang mit der vorhergehenden Frage über den Wellenwiderstand erörtert worden. Die Möglichkeit einer Rückführung auf nationale oder internationale Standards hängt hierbei von dem Leitungstyp ab, in dem die Kalibrierstandards realisiert sind und zur Anwendung kommen sollen. Im Fall koaxialer Kalibrierstandards kann die Frage mit einem klaren „Ja“ beantwortet werden.

Handelt es sich jedoch um planare Strukturen so ist eine Rückführbarkeit **häufig nur noch mittelbar möglich**. Theoretisch können auch noch so „exotische“ Strukturen auf das physikalische Modell eines Primärstandards zurückgeführt werden. Bei Bedarf wird dies im Einzelfall geprüft und über das R&S-Kalibrierlabor abgewickelt.

26. Kann zur Kalibrierung ein „Dummy“ verwendet werden, der es ermöglicht, innerhalb und außerhalb eines Gehäuses zu kalibrieren?

Für eine Kalibrierung zur Messung an gehäusten Bauteilen können sowohl die inneren Anschlüsse im Gehäuse als auch die äußeren Gehäuseanschlüsse als Referenzebene benutzt werden. Zur Kalibrierung an den inneren Anschlüssen lassen sich, beispielsweise durch Einbau von Kalibriersubstraten, **Leergehäuse („Dummys“) so modifizieren, daß sie sich als Kalibrierstandards eignen**. Sind die Gehäuse gut angepaßt und verlustarm, kann man diese Standards auch zur Kalibrierung an den äußeren Anschlüssen verwenden. Das geeignete Kalibrierverfahren ist die TNA-Methode (R&S-Patent), welche nur drei Kalibrierstandards, nämlich T = Through, N = Network und A = Attenuator erfordert, die besonders einfach zu realisieren sind. Für T benötigt man als Ersatz für den Prüfling eine direkte Durchverbindung, N bedeutet ein reflexionssymmetrisches, ansonsten jedoch beliebiges und unbekanntes Netzwerk, welches besonders einfach durch Weglassen des Prüflings, also offene Klemmen (für äußere Kalibrierung) beziehungsweise leeres Gehäuse (für innere Kalibrierung), erreicht werden kann. Der Standard A ist durch beidseitige Anpassung charakterisiert, wobei ein beliebiges und unbekanntes Übersprechen zwischen den

Meßstoren zugelassen ist. Die genannten Standards können in vielen Anwendungsfällen in der Form der Gehäuse aufgebaut werden oder in leere Gehäuse des Prüflings eingebaut werden. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, daß bei der Verwendung in automatischen Prüfstationen die Kalibrierstandards ebenso wie die Prüflinge selbst dem Meßadapter automatisch zugeführt werden können.

27. Beeinträchtigt das Embedding/Deembedding die Meßgeschwindigkeit?

Nein. Die für die Virtuellen Transformationsnetzwerke benötigten Daten werden vorab mit den vorhandenen Kalibrierdaten (Systemfehlermatrizen) des Netzwerkanalysators rechnerisch verknüpft. Statt mit den ursprünglichen Systemfehlermatrizen werden während der Messungen dann die so modifizierten Matrizen benutzt. Deshalb sind während der Messungen **keine zusätzlichen Berechnungen erforderlich**, die über die ohnehin durchgeführten und mit hoher Geschwindigkeit ablaufenden Systemfehlerkorrekturrechnungen hinausgehen. Die **Meßgeschwindigkeit bleibt genauso hoch** wie bei konventionellen Messungen ohne Virtuelle Netzwerke.

28. Läßt sich das Virtuelle Transformationsnetzwerk nur durch Messungen ermitteln oder kann man es auch synthetisieren?

Ja, das Virtuelle Transformationsnetzwerk kann beispielsweise **mit Hilfe eines gängigen Simulationsprogramms wie SuperCompact** konzipiert und simuliert werden, wobei übrigens diese Simulationsrechnungen mit Hilfe der optionalen Rechnerfunktion ZVR-B15 direkt mit dem Netzwerkanalysator selber durchgeführt werden können. Die Streuparameter des Virtuellen Transformationsnetzwerks werden als FLP-Datei (S-Parameter-Datensatz für Mehr Tore) vom Netzwerkanalysator übernommen, mit den Systemfehlerkorrekturmatrizen zu modifizierten Matrizen verknüpft, die bei den anschließenden Objektmessungen anstelle der ursprünglichen Matrizen benutzt werden.

Olaf Ostwald, 1ES3
Rohde & Schwarz
19.1.1998

29 Applikationsschriften

- [1] H.-G. Krekels: Automatic Calibration of Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ30_2E.
- [2] O. Ostwald: 3-Port Measurements with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ26_1E.
- [3] O. Ostwald: 4-Port Measurements with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ25_1E.
- [4] T. Bednorz: Measurement Uncertainties for Vector Network Analysis, Appl. Note 1EZ29_1E.
- [5] P. Kraus: Frequenzumsetzende Messungen mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ31_1D.
- [6] J. Ganzert: Accessing Measurement Data and Controlling the Vector Network Analyzer via DDE, Appl. Note 1EZ33_1E.
- [7] J. Ganzert: File Transfer between Analyzers FSE or ZVR and PC using MS-DOS Interlink, Appl. Note 1EZ34_1E.
- [8] O. Ostwald: Group and Phase Delay Measurements with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ35_1E.
- [9] O. Ostwald: Mehrformmessungen mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ37_1D.
- [10] O. Ostwald: Fragen und Antworten zum Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ38_3D.
- [11] A. Gleißner: Interner Datentransfer zwischen Windows 3.1 / Excel und vektoriellem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ39_1D.
- [12] A. Gleißner: Power Calibration of Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ41_2E.
- [13] O. Ostwald: Pulsed Measurements on GSM Amplifier SMD ICs with Vector Network Analyzer ZVR, Appl. Note 1EZ42_1E.
- [14] O. Ostwald: Zeitbereichsmessungen mit dem Netzwerkanalysator ZVR, Appl. Note 1EZ44_1E.

30 Bestellangaben

Bestellbezeichnungen	Kurz-bez.	Frequenzbereich	Bestellnummer
Netzwerkanalysatoren (Testset enthalten) *			
3-Kanal unidirektional 50Ω, passiv	ZVRL	9 kHz...4 GHz	1043.0009.41
3-Kanal bidirektional 50Ω, passiv	ZVRE	9 kHz...4 GHz	1043.0009.51
3-Kanal bidirektional 50Ω, aktiv	ZVRE	300 kHz...4 GHz	1043.0009.52
4-Kanal bidirektional 50Ω, passiv	ZVR	9 kHz...4 GHz	1043.0009.61
4-Kanal bidirektional 50Ω, aktiv	ZVR	300 kHz...4 GHz	1043.0009.62
3-Kanal bidirektional 50Ω, aktiv	ZVCE	20 kHz...8 GHz	1106.9020.50
4-Kanal bidirektional 50Ω, aktiv	ZVC	20 kHz...8 GHz	1106.9020.60
Alternative Testsets *			
75-Ω-Meßbrücke für ZVRL (anstelle 50 Ω) ¹⁾			
75 Ω, passiv	ZVR-A71	9 kHz...4 GHz	1043.7690.18
75-Ω-Meßbrückenpaare für ZVRE und ZVR (anstelle 50 Ω) ¹⁾			
75 Ω, passiv	ZVR-A75	9 kHz...4 GHz	1043.7755.28
75 Ω, aktiv	ZVR-A76	300 kHz...4 GHz	1043.7755.29
Optionen			
AutoKal	ZVR-B1	0...8 GHz	1044.0625.02
Zeitbereichstransformation	ZVR-B2	wie Analysator	1044.1009.02
Frequenzumsetzende Messungen ²⁾	ZVR-B4	wie Analysator	1044.1215.02
Referenzkanalitore	ZVR-B6	wie Analysator	1044.1415.02
Pegelkalibrierung ³⁾	ZVR-B7	wie Analysator	1044.1544.02
Dreitor-Adapter	ZVR-B8	0...4 GHz	1086.0000.02
Virtuelle Transformationsnetzwerke ⁴⁾	ZVR-K9	wie Analysator	1106.8830.02
Viertor-Adapter (2xSPDT)	ZVR-B14	0...4 GHz	1106.7510.02
Viertor-Adapter (SP3T)	ZVR-B14	0...4 GHz	1106.7510.03
Controller (deutsch) ⁵⁾	ZVR-B15	-	1044.0290.02
Controller (englisch) ⁵⁾	ZVR-B15	-	1044.0290.03
Ethernet BNC für ZVR-B15	FSE-B16	-	1073.5973.02
Ethernet AUI für ZVR-B15	FSE-B16	-	1073.5973.03
IEC/IEEE-Bus Interface für ZVR-B15	FSE-B17	-	1066.4017.02
Generatoreichleitung PORT 1	ZVR-B21	wie Analysator	1044.0025.11
Generatoreichleitung PORT 2 ⁶⁾	ZVR-B22	wie Analysator	1044.0025.21
Empfängereichleitung PORT 1	ZVR-B23	wie Analysator	1044.0025.12
Empfängereichleitung PORT 2	ZVR-B24	wie Analysator	1044.0025.22
Externe Messungen, 50 Ω ⁷⁾	ZVR-B25	10 Hz...4 GHz (ZVR/E/L) 20 kHz...8 GHz (ZVC/E)	1044.0460.02

¹⁾ Nur zusammen mit Bestellung von ZVR/E/L.

²⁾ Beinhaltet Oberwellenmessungen.

³⁾ Benötigt einen Leistungsmesser mit Sensor.

⁴⁾ Nur für ZVR oder ZVC mit ZVR-B15.

⁵⁾ Beinhaltet DOS, Windows 3.11, Tastatur und Maus.

⁶⁾ Nur für ZVR oder ZVC.

⁷⁾ Eichleitungen erforderlich.

*** Hinweis:**

Aktiv-Testset enthält im Gegensatz zum Passiv-Testset eine Gleichstromzuführung, z. B. zur Versorgung aktiver Meßobjekte.