

Vektorieller 100-MHz-Antennen-analysator für jedermann (1)

MICHAEL KNITTER – DG5MK

Funkamateure, die ihre Antennen selbst bauen, wissen den Wert eines vektoriell messenden Antennenanalysators zu schätzen. Das vorgestellte Gerät zeichnet sich durch hohe Genauigkeit, geringe Abmessungen und einfache Handhabung aus. Es ermöglicht Zweipolmessungen im Frequenzbereich von 100 kHz bis 100 MHz in Bezug auf eine Systemimpedanz von 50 Ω. Der DG5MK-Antennenanalysator wird demnächst als Komplettbausatz beim FA-Leserservice erhältlich sein.

Experimente mit Antennen machen für viele Funkamateure einen wesentlichen Teil des Hobbys aus. Die Messung des Stehwellenverhältnisses (SWV) und die Bestimmung von Impedanzwerten gehören untrennbar dazu. Ersteres lässt sich beim Senden mittels eines SWV-Meters abschätzen. Umfangreichere und genauere Daten erhält man jedoch mithilfe eines Antennenanalysators. Gute Geräte sind allerdings teuer, preisgünstige meist unpräzise.

Imaginärteils. Die aus dem professionellen Bereich stammende sogenannte *SOL-Kompensation* (Erläuterung siehe gleichnamiger Abschnitt) erlaubt präzise Messungen in unterschiedlichen Konfigurationen. Ein Grafikdisplay ermöglicht die Darstellung von komplexer Impedanz, Stehwellenverhältnis, Kapazität und Induktivität. Der Einsatz preiswerter Bauelemente ermöglicht es, die Materialkosten überschaubar zu halten.



Bild 1: Mustergerät des vektoriellen Antennenanalysators, hier mit 50-Ω-Abschlusswiderstand am Eingang

Der im Folgenden beschriebene Antennenanalysator schließt diese Lücke. Es handelt sich hier um ein vollwertiges, vektoriell messendes Gerät für den Frequenzbereich von 100 kHz bis 100 MHz (Bild 1, Tabelle 1). Vektorielle Messung bedeutet, dass im Gegensatz zu einer skalaren nicht nur das SWV ermittelt und angezeigt wird, sondern auch der Wert der Fußpunktimpedanz einschließlich des vorzeichenbehafteten

Im ersten Teil des Beitrags geht es um Aufbau und Funktion des Antennenanalysators. Zum besseren Verständnis des Messprinzips und der Arbeitsweise werden im zweiten Teil der mathematische Hintergrund und die Einzelheiten der Umsetzung behandelt.

■ Impedanzmessung

Das Stehwellenverhältnis am Antennenfußpunkt kann aus der Messung der Impedanz

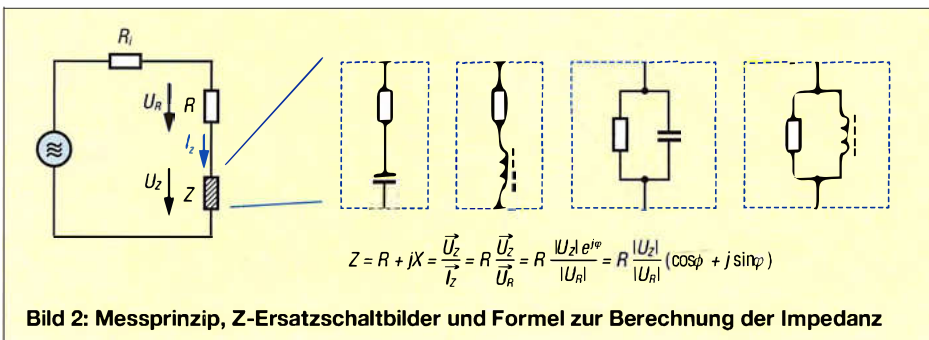


Bild 2: Messprinzip, Z-Ersatzschaltbilder und Formel zur Berechnung der Impedanz

Tabelle 1: Technische Daten des Mustergeräts

Frequenzbereich	0,1... 100 MHz, (Auflösung: 1 Hz)
Messbereichsgrenzen	$s \leq 100$, $Z \leq 1000 \Omega^*$
Messergebnis	vollständiger Impedanzwert (Resistanz und Reaktanz), einschließlich Vorzeichen
Genauigkeit	$\leq 2\%$ ($f = 0,1... 50$ MHz, $Z < 1000 \Omega$)
Signalverarbeitung	24-Bit-ADU, 16-Bit-DSP, 32-Bit-Berechnung
Spannungsversorgung	$2 \times 1,5$ -V-Mignon-Batterie o. $2 \times 1,2$ -V-Akkumulatorzelle
Messeingang	50 Ω, BNC
Ausgangssignal	7 dBm, rechteckförmig
Stromaufnahme	49 mA** (110 mA) bei 100 MHz, Lastwiderstand 50 Ω, Beleuchtung abgeschaltet
Abmessungen	175 mm × 95 mm × 25 mm (L × B × H)
Masse	270 g inkl. NiMH-Zellen

* Messungen auch darüber hinaus möglich, dann aber mit geringerer Genauigkeit
** Mittelwert, Spitzenwert in Klammern

bestimmt werden. Diese lässt sich durch ein Ersatzschaltbild aus Reihen- oder Parallelschaltung eines ohmschen Widerstands mit dem Blindwiderstand eines Kondensators oder einer Spule veranschaulichen. Nach dem ohmschen Gesetz ist die Impedanz der Quotient aus Spannung und Strom am Messobjekt. Aufgrund des evtl. vorhandenen Scheinwiderstands verschiebt sich allerdings die Phase zwischen Spannung und Strom. Daher ist zusätzlich zu deren Amplitudenverhältnis (oder dem zwischen zwei Spannungen an einem Widerstand R) auch deren Phasenverschiebung zu messen.

Bild 2 verdeutlicht diese Zusammenhänge. Ein Antennenanalysator zeigt in der Regel die Impedanz in der Form $R + jX$ an. R stellt den ohmschen Widerstand (Resistanz), X den Blindwiderstand (Reaktanz) der Reihenschaltung dar. Je nachdem, ob Letzterer kapazitiv oder induktiv ist, ergibt sich ein negatives oder positives Vorzeichen.

Beim hier beschriebenen Messgerät wird die Impedanz wie folgt bestimmt: Der Antenne wird ein Messsignal mit definierter Frequenz zugeführt. Die Impedanz der Antenne bewirkt dessen Veränderung in Amplitude und Phase. Gelingt es, diese Änderung mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen, lassen sich daraus Impedanz und Stehwellenverhältnis berechnen. Ziel der gesamten Signalverarbeitung ist daher, das Amplitudenverhältnis zweier HF-Spannungswerte und deren Phasenverschiebung zu bestimmen. Diese Impedanzmessung ist jedoch nicht auf Antennenmessungen

beschränkt. Genau genommen handelt es sich um die Zweitormessung eines beliebigen Testobjekts. Der Antennenanalysator kann daher beispielsweise auch zum Messen von Kondensatoren und Spulen bei einer frei wählbaren Frequenz genutzt werden. Generell sind alle Messungen möglich, bei denen die Bestimmung der Impedanz im Mittelpunkt steht. Details zu weiteren diesbezüglichen Methoden können in [1] nachgelesen werden.

■ Blockschaltbild

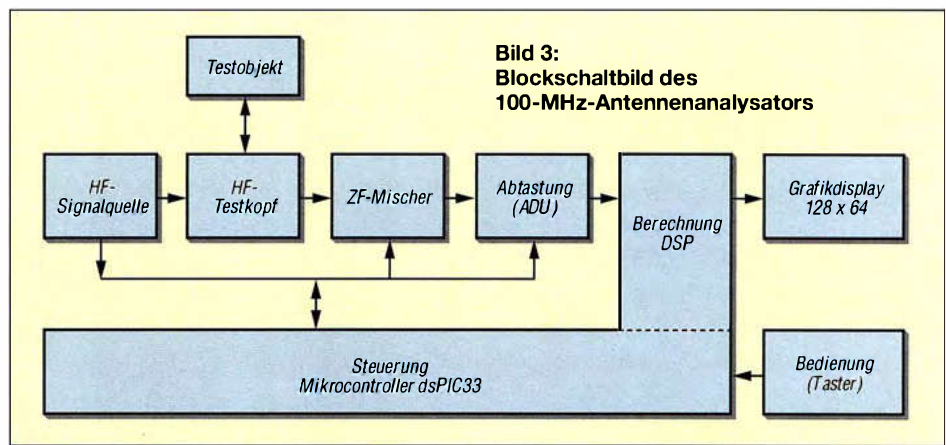
In Bild 3 sind die verwendete Signalkette sowie die Kernkomponenten des Antennenanalysators dargestellt. Die HF-Signalquelle stellt ein Testsignal zur Verfügung, welches über den Testkopf an das Testobjekt weitergeleitet wird. Der Testkopf stellt neben dem Original- das in Amplitude und Phase veränderte Signal zur Verfügung. Ideal wäre es nun, dieses Signal mit einem sehr schnellen (und damit teuren) Analog-Digital-Umsetzer zu digitalisieren und die gesamte weitere Verarbeitung als digitale Signalverarbeitung (DSP) im Prozessor durchzuführen. Dies würde die Projektkosten jedoch erheblich in die Höhe treiben. Stattdessen werden die Signale zunächst auf eine Zwischenfrequenz (ZF) von 1 kHz gemischt und dann digitalisiert, um anschließend vom Mikrocontroller verarbeitet zu werden. Dieses Konzept entspricht dem eines Einfach-Überlagerungsempfängers. Weitere Komponenten für die Anwenderschnittstelle wie Display und Tasten zur Gerätebedienung sind selbstverständlich ebenfalls erforderlich.

Signalquelle

Als Signalquellen in Analysatoren werden vielfach DDS-Schaltkreise des Herstellers *Analog Devices* verwendet. Diese stellen ein exzellentes Sinussignal zur Verfügung, haben jedoch zwei Nachteile: hohe Kosten und hohe Stromaufnahme. Ein einzelner DDS-IC braucht bis zu 100 mA und zu meist werden zwei davon benötigt. Eine Alternative sind programmierbare Quarzoszillatoren, die ein Rechtecksignal erzeugen. Es wurde daher ein multipler Quarzoszillator von *Silicon Laboratories* eingesetzt, der nicht nur deutlich billiger ist als ein DDS-IC, sondern auch mit weniger als 35 mA auskommt. Aufgrund seiner guten Konfigurationsfähigkeit wird dieser Quarzoszillator gleichzeitig als Signalquelle, als LO für den Mischer und als Taktquelle für den ADU verwendet.

Testkopf

Dem Testkopf kommt beim Entwurf eines Analysators eine sehr wichtige Rolle zu. Er entscheidet, welche Spannungsbereiche



mit akzeptablem Signal-Rausch-Verhältnis messbar sind und muss auf das Gesamtsystem abgestimmt sein. Es wird an dieser Stelle eine Widerstandsmessbrücke in einer Konfiguration für Strom- und Spannungsmessung verwendet.

Mischer

Als preiswerter Mischer käme zunächst der weithin bekannte NE612/SA602 infrage. Allerdings stellt ein kompakter Analysator ganz besondere Anforderungen, da die Anzeigeeinheit hier räumlich über dem Testkopf und der Mischersektion liegt. Hinzu kommt, dass der Messsignalgenerator bis zu 40 mV Rauschen auf den Versorgungsleitungen erzeugt. Der NE612/SA602 ist für sehr geringe Mischerpegel bis 6 mV ausgelegt. Signale müssten in diesem Fall entsprechend skaliert werden und Einstreuungen wären nur schwer in den Griff zu bekommen. Stattdessen bietet sich der Einsatz eines Großsignalmischers an. Der zu diesem Zweck gewählte Analogschalter-IC stellte sich im konkreten Anwendungsfall als gut geeignet heraus. Frequenzbereich bis 100 MHz, niedriger Einschaltwiderstand, hohe Linearität bei einem Arbeitspunkt auf Höhe der halben Betriebsspannung und nicht zuletzt ein attraktiver Preis waren ausschlaggebende Argumente.

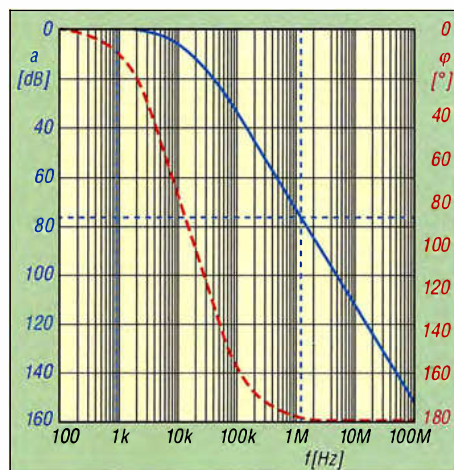


Bild 4: Simulierte Übertragungsfunktion des Anti-Aliasing-Filters

Kann jedoch die Mischung zweier Rechtecksignale zu einem Ergebnis führen, bei dem die Amplitudenverhältnisse und die Phasenverschiebung der Signale erhalten bleiben? Die vorweggenommene Antwort lautet „Ja“, denn die digitale Signalverarbeitung macht dies möglich (siehe Teil 2 des Beitrags in der folgenden Ausgabe).

Analog-Digital-Umsetzer

Nahezu alle Mikrocontroller verfügen über eingebaute Analog-Digital-Umsetzer (ADU). Deren Auflösung von 10 Bit oder 12 Bit bei mittleren Abtastraten und hohe Nichtlinearitäten erlauben in diesem Anwendungsfall jedoch keine ausreichend präzise Digitalisierung der Signale. Da lediglich ein ZF-Signal von 1 kHz abzutasten ist, liegt der Einsatz eines Audio-ADU nahe. *Texas Instruments* stellt solche Lösungen zur Verfügung. Allerdings sind diese recht teuer. Preisgünstiger ist eine Lösung von *Microchip* in Form eines zweikanaligen 24-Bit-ADU. Bei lediglich 10 mW Leistungsaufnahme kann damit ein 1-kHz-Signal mit bis zu 1250-facher Überabtastung digitalisiert werden. Diese Überabtastung erlaubt die einfache Auslegung des Anti-Aliasing-Filters. Signale mit Frequenzen bis zu 1,25 MHz können direkt digitalisiert werden. Solche mit höheren Frequenzen sind zwecks Vermeidung von Verzerrungen zu dämpfen. Dies geschieht im vorliegenden Gerät ganz ohne Drosseln mittels einer Kaskade aus zwei RC-Tiefpassfiltern. Die simulierte Übertragungsfunktion dieser Anordnung ist in Bild 4 zu sehen. Bei der Zwischenfrequenz von 1 kHz (erste senkrechte blaue Strichlinie) wird das Signal lediglich um 0,2 dB gedämpft. Bei 1,25 MHz beträgt die Dämpfung 76,6 dB. Da die Signale im Mikrocontroller lediglich mit einer Wortbreite von 16 Bit verarbeitet werden, passt die Übertragungsfunktion zum Gesamtkonzept.

Prozessor und DSP

Als Prozessor kommt ein Mikrocontroller mit DSP-Kern von *Microchip* zum Einsatz,

der dsPIC33FJ128. Dieser hat genug Rechenleistung für die erforderliche digitale Signalverarbeitung und kann nebenher noch die gesamte Ablaufsteuerung und Anwenderschnittstelle samt LC-Display bedienen.

Die Taktgenerierung für den Mikrocontroller geschieht schaltkreisintern über einen RC-Oszillator und wird von der Software dynamisch variiert, je nachdem, welche Aufgaben zu erledigen sind. Während relativ langer Anzeigezeiten hilft eine niedrige Taktfrequenz, Strom zu sparen, während für die DSP-Verarbeitung maximale Leistung benötigt wird.

Das über einen SPI-Bus angeschlossene grafische LC-Display hat eine Auflösung von 128×64 Pixeln und eine sehr geringe Stromaufnahme bei abgeschalteter Hintergrundbeleuchtung. Ebenfalls SPI-Bus-gesteuert ist der 24-Bit-ADU. Zusätzlich initiiert dieser eine Unterbrechungsanforderung beim Mikrocontroller: Sobald ein Messwert verfügbar ist, wird während des Abtastvorgangs eine Verarbeitung angestoßen.

Der Quarzoszillator, der das Testsignal sowie Mischer- und ADU-Takt liefert, erhält seine Steuerbefehle über einen I²C-Bus vom Mikrocontroller, ebenso wie der EEPROM-IC, der zur Ablage von Systemparametern und Kompensationswerten dient.

Um den Betrieb aus nur zwei Batteriezellen zu ermöglichen, kommt ein Schaltregler zum Einsatz. In einer früheren Variante des Geräts wurden alle Kernkomponenten über separate Spannungsregler versorgt. Messungen ergaben jedoch, dass diese aufgrund der Auslegung der Signalkette entbehrlich waren, ohne die Messgenauigkeit wesentlich zu verschlechtern.

In den Bildern 6 und 7 sind die Vorder- und Rückseite der bestückten Platine des Mustersaufbaus zu sehen. Die SMD-Bauelemente sind auf der Vorderseite bestückt, die Bauteildichte ist relativ gering.

■ SOL-Kompensation

Um präzise Messungen durchführen zu können, verfügt der Antennenanalysator über eine SOL-Kompensation (*Short, Open, Load*), wie sie auch im professionellen Be-



Bild 5: BNC-, Stecksocket- und SMA-SOL-Standards (v.l. n. r.) als Kalibrierelemente

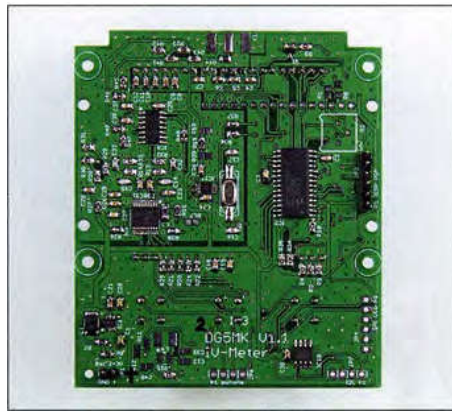


Bild 6: SMD-Bestückungsseite der Musterplatine des Antennenanalysators

reich üblich ist [2]. Jeder Stecker und jedes Kabel beeinflusst die Messung des Testobjekts. Dieser Einfluss lässt sich durch die SOL-Methode vollständig kompensieren. Dabei werden anstelle des Testobjekts zunächst nacheinander drei Kalibrierelemente angeschlossen. *Short* stellt einen Kurzschluss, *Open* einen offenen Ausgang und *Load* einen $50\text{-}\Omega$ -Widerstand dar. Diese Elemente können bei akzeptabler Genauigkeit leicht selbst mithilfe von drei Steckern hergestellt werden (Bild 5).

Nach Messung der Referenzen speichert der Analysator die ermittelten Werte automatisch ab und bezieht sie als Kompensationsgrößen bei der anschließenden Messung des Testobjekts ein. Auf diese Weise wird die korrekte Impedanz ermittelt.

Der Antennenanalysator kennt zwei Modi der SOL-Kompensation: *SOL für alle Frequenzen* und *SOL für die aktuelle Frequenz*. Während bei der ersten Methode die nach einem Grunddurchlauf abgespeicherten Kompensationswerte verwendet werden, lassen sich mit der zweiten Methode schnell aktuelle Kompensationswerte für eine einzelne Frequenz generieren. Der Anwender hat dadurch die Wahl zwischen Schnellmessung oder genauer Messung mit erforderlicher Kompensation.

■ Bedienung und Funktionalität

Zum Anschluss des Messobjekts dient eine BNC-Buchse. Für die Bedienung und Anzeige stehen ein Wippschalter, drei Taster und ein grafisches LC-Display zur Verfügung.

Alle eingestellten Parameter werden im nichtflüchtigen Speicher des Geräts (EEPROM) abgelegt. Daher befindet sich das Gerät nach dem Einschalten im gleichen Betriebsmodus wie vor dem Ausschalten. Die drei Taster haben je nach gewähltem Mess- oder Bedienmodus unterschiedliche Funktionen, die jeweils aktuellen werden im Display angezeigt. So lässt sich beispielsweise die zu ändernde Stelle der Messfrequenz mit dem linken Taster auswählen, während der mittlere und rechte

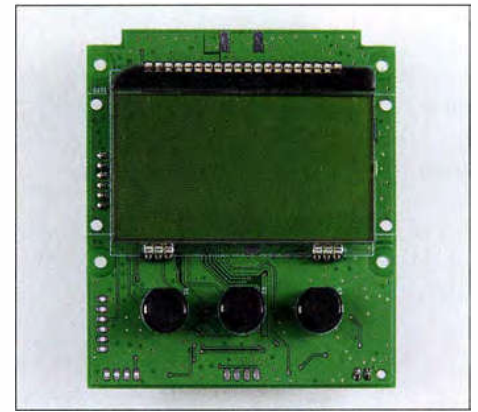


Bild 7: Platinerückseite mit LC-Display und Tastern
Fotos: DG5MK, Red. FA

diesen Wert erhöhen bzw. verringern. Mit einem längeren Druck auf den linken Taster kann man das Menü aufrufen und sich mithilfe der Taster dann darin bewegen.

Menüsteuerung

Die vorhandenen Auswahlmöglichkeiten werden später in der Bedienungsanleitung zum Bausatz ausführlich beschrieben. Hier soll nur das Ergebnis gezeigt werden, das je nach Betriebsart und Anzeigemodus auf dem Display erscheint.

Während in der Darstellung nach Bild 8 der Schwerpunkt auf dem SWV liegt, zeigt die Impedanzmessung in Bild 9 u. a. die Werte der kapazitiven und induktiven Komponente der Impedanz inklusive Vorzeichen direkt an.

Die Fünf-Band-Messung stellt das SWV bei fünf unterschiedlichen, frei wählbaren Frequenzen gleichzeitig dar (Bild 10). Das kann z. B. beim Abgleich von Multibandantennen hilfreich sein. Dort hat die Änderung eines Bandabgleichs oft Auswirkungen auf die Werte anderer Bänder, sodass die gleichzeitige Darstellung der Ergebnisse in der Praxis recht komfortabel ist.

Die Mehrfrequenzmessungen (Bild 11 und 12) ermöglichen die Darstellung von SWV oder Impedanz über einen frei wählbaren Frequenzbereich (Wobbelbetrieb).

Weitere Anwendungsfälle sind der Einsatz als Dip-Meter oder Signalgenerator.

■ Vergleichsmessung

Um die Genauigkeit des Messgeräts beurteilen zu können, wurden unter anderem Vergleichsmessungen auf Basis eines Testablaufs des ARRL-Labors durchgeführt [3] und Kombinationen aus Widerständen, Kondensatoren und Spulen nach entsprechender SOL-Kompensation ausgemessen. Referenzgerät war ein Netzwerkanalysator (VNA) nach DG8SAQ mit zusätzlichem RF-IV-Testkopf. Die Resultate sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Gegenüber den in [3] getesteten portablen Antennenanalysatoren unterschiedlicher Hersteller sind dies sehr gute Ergebnisse.

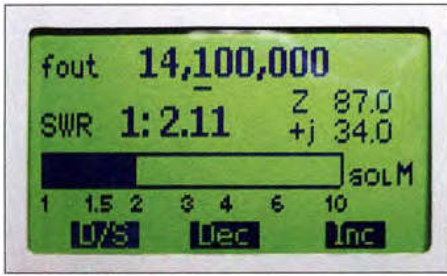


Bild 8: SWV-Messung

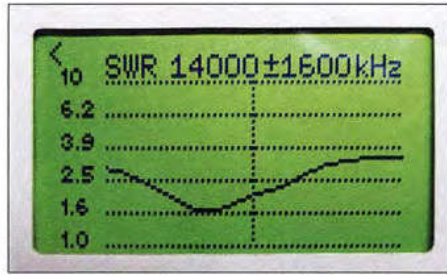


Bild 11: Mehrfrequenzmessung SWV



Bild 9: Impedanzmessung

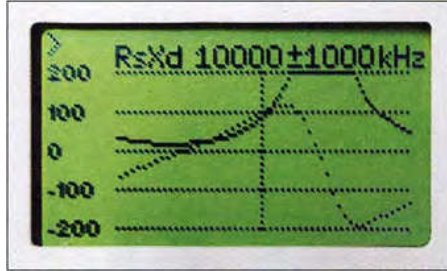


Bild 12: Mehrfrequenzmessung Impedanz

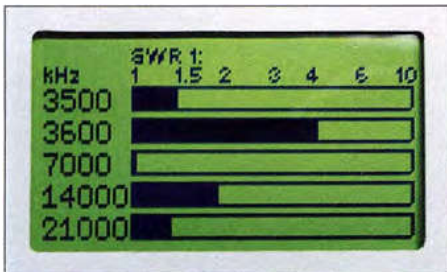


Bild 10: Fünf-Band-Messung

Abgesehen vom verwendeten Referenzgerät Agilent 4291B werden alle dort genannten Analytoren hinsichtlich der Messgenauigkeit in den meisten Bereichen übertroffen.

■ Ausblick

Der beschriebene Antennenanalysator nimmt aufgrund seines Konzepts im Bereich der Portabelgeräte derzeit eine Sonderstellung ein. Die vom Üblichen abweichende Wahl der Bauelemente in Kombination mit einer leistungsstarken Signalverarbeitung machen ihn zu einem univer-

sellen präzisen Messgerät für ambitionierte Funkamateure und Hobbyelektroniker. Er ist nicht nur zur Optimierung der stationären Antennenanlage und für Messungen im Elektroniklabor geeignet, sondern leistet auch unterwegs beim Portabelbetrieb oder beim Fieldday gute Dienste.

Der vom FA-Leserservice geplante Komplettbausatz wird zu einem günstigen Preis erhältlich und so ausgelegt sein, dass der Nachbau problemlos möglich ist. Zum Lieferumfang wird neben einem bearbeiteten Gehäuse auch die SMD-bestückte Platine gehören, auf der sich fast alle Bauelemente einschließlich des programmierten Mikrocontrollers befinden.

(wird fortgesetzt)

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Agilent Technologies: Impedance Measurement Handbook. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>
- [2] Agilent Technologies: Network Analyser Basics. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7917E.pdf>
- [3] Wilson, M. J, K1RO: A Look at Four Antenna Analyzers. QST 96 (2012) H. 2, S. 46-52

Tabelle 2: Vergleichende Ergebnisse zur Beurteilung der Messgenauigkeit

Last bzw. Messobjekt	Ist-Werte [Ω] in Abhängigkeit von der Messfrequenz			
	1 MHz	10 MHz	50 MHz	100 MHz
11,0 Ω	11,0 + j 0,0	11,0 + j 0,0	10,9 + j 0,5	11,1 + j 1,1
50,0 Ω	50,0 + j 0,0	50,0 + j 0,0	50,0 + j 0,1	50,1 + j 0,1
75,0 Ω	75,1 + j 0,0	75,0 + j 0,0	75,3 + j 0,8	75,2 + j 0,6
99,8 Ω	99,9 + j 0,0	99,8 + j 0,0	100 - j 2,2	100 - j 0,2
149,4 Ω	150 + j 0,1	149 + j 0,0	150 - j 6,2	150 - j 1,7
199,5 Ω	200 + j 0,1	200 + j 0,0	201 - j 6,2	200 - j 5,6
673,8 Ω	672 + j 0,5	671 + j 0,4	667 - j 10,2	665 - j 11,5
15,13 Ω , 162 nH*	15,13 + j 1,0	15,13 + j 10,2	15,13 + j 50,9	15,13 + j 101,8
Messwerte:	15,3 + j 1,0	15,2 + j 10,1	15,5 + j 50,6	13,6 + j 102
22 Ω , 230 pF*	22 - j 692	22 - j 69,2	22 - j 13,8	22 - j 6,9
Messwerte:	27,2 - j 712	22,2 - j 70,8	22,2 - j 12,8	22,4 - j 5,0
149,99 Ω , 150 nH*	149,99 + j 0,9	149,99 + j 9,4	149,99 + j 47,1	149,99 + j 94,2
Messwerte:	134 + j 0,6	134 + j 5,4	156 + j 44,6	157 + j 99,2
149,87 Ω , 150 pF*	149,87 - j 1061	149,87 - j 106,1	149,87 - j 21,2	149,87 - j 10,6
Messwerte:	138 - j 885	131 - j 90,5	148 - j 26,2	150 - j 10,6

Soll- bzw. Referenzwerte: **schwarz**, Ist-Werte (mit DG5MK-Antennenanalysator gemessen): **blau**
* Reihenschaltung

NEUE HIGHLIGHTS



Saleae, PC-basierte Logik Analyzer
3-100 MHz Bandbreite, 4-16 Kanäle, 12-500 MS/s Abtastrate. Professionelle Logikanalysatoren mit einer besonders durchdachten und benutzerfreundlichen PC Software. Einfach per USB mit Ihrem PC verbinden und loslegen.

ab **€ 118,-**
inkl. MwSt. und Versand



LabNation, PC-basiertes 2 Kanal DSO
30MHz, 2 Kanäle, 100 MS/s. PC, Tablet und Smartphone-basiertes Zweikanal Digital Oszilloskop, 2 Jahre Garantie.

€ 229,-
inkl. MwSt. und Versand



Besuchen Sie uns auf dem Batronix Messestand 203, probieren Sie alle Geräte aus und sichern Sie sich Ihre Messerabatte!
Die embedded world findet vom 14. bis 16.03.17 in Nürnberg statt.

Tipp: Ab sofort erhalten Sie bei jedem Kauf zwei Eintrittskarten im Wert von 50,- gratis dazu.

Nutzen Sie unsere aktuellen Angebote:

www.batronix.com/go/69

TIPP