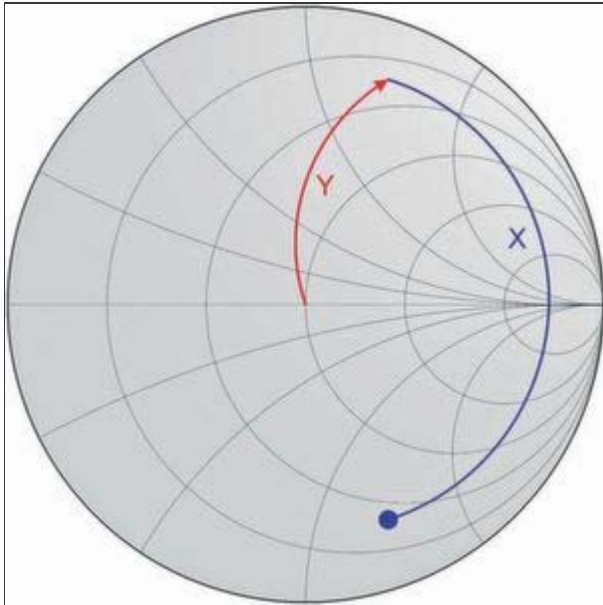


Impedanzen messen

Was Sie über den Load-Pull-Test wissen sollten

21.03.17 | Autor / Redakteur: Gary Simpson und Maximilian Tschernitz * / [Hendrik Härter](#)



Impedanz messen mit dem Load-Pull-Test: Das Bild zeigt die Auswirkungen von horizontalen und vertikalen Sondenbewegungen auf die eingestellte Impedanz. (Bild: bsw TestSystems & Consulting)

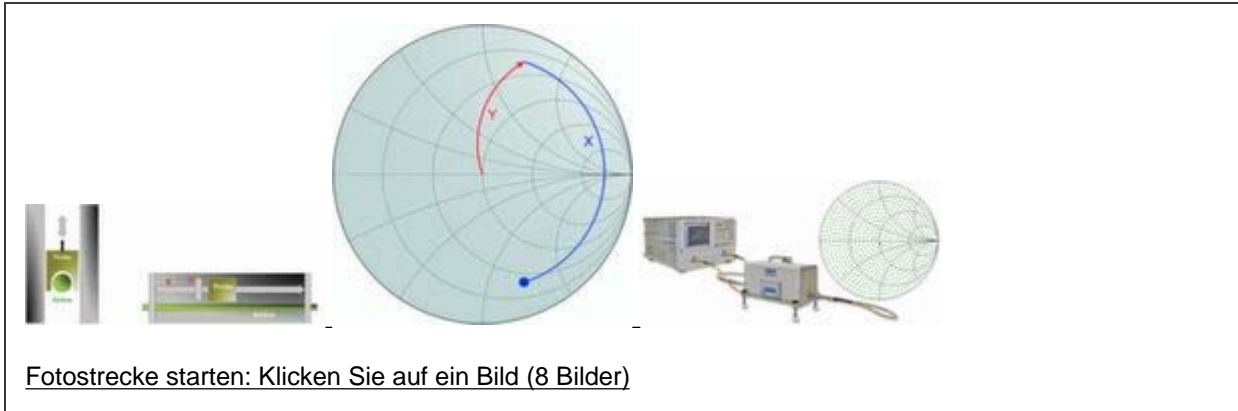
Der Load-Pull-Test ist nicht nur ein Werkzeug für die Entwicklung eines Verstärkers. Im Beitrag zeigen wir Grundlagen und erforderliche Werkzeuge, damit Anwender mit der Messmethode arbeiten können.

Messungen mit einer Abweichung von 50 Ohm bei den Impedanzwerten sind ein heißes Thema. Warum ist das so?

Das als Load-Pull-Technik bekannte Verfahren wird eingesetzt, um Verstärker zu entwickeln sowie für die Extraktion und Validierung von Modellen; eingesetzt wird das Verfahren auch bei Leistungs- und Robustheitstests.

Traditionell findet sich die Load-Pull-Technik, um die Impedanz eines nichtlinearen HF-Geräts bei maximaler HF-Leistung zu messen. Die Lastimpedanz oder auch Load wird so manipuliert, dass diese einen von 50 Ohm abweichenden Wert annimmt. Der Prüfling reagiert auf unterschiedliche Weise auf die verschiedenen Impedanzen.

BILDERGALERIE



Das Ziel dabei ist zu verstehen, wie sich die Leistung des Bauteils bzw. dessen Empfindlichkeit bei variablen Lastbedingungen ändert. Load-Pull wird mithilfe von sogenannten Impedanztunern realisiert. Das sind Geräte, deren Impedanz verändert werden kann.

Der am häufigsten eingesetzte Typ eines Impedanztuners ist der **Slide-Screw-Tuner**, der aus einer Präzisions-Stableitung mit 50 Ohm besteht. Diese wiederum besteht aus zwei parallelen Platten und einem dazwischenliegenden Leiter sowie einer metallischen Messsonde, dem Slug. Wird die Messsonde komplett aus der Stableitung herausgezogen, dann passiert das Signal den Tuner mit minimaler Interferenz (Bild 1).

Taucht die Sonde in die Stableitung ein, wird das elektrische Feld des Signals unterbrochen und ein Teil des Signals wird zurück zum Prüfling reflektiert. Je tiefer die Messsonde eintaucht, desto stärker die Reflexion. Dieser Wert ist als Gamma-Wert oder Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) bekannt.

Wenn sich die Position der Sonde relativ zum Prüfling ändert, dann ändert sich auch der Abstand zwischen dem Tuning-Element, also der Sonde, sowie dem Prüfling und damit die Phase der Reflexion. Durch Bewegungen der Sonde kann der Prüfling mit nahezu jeder Impedanz beaufschlagt werden, wobei alle im Smith-Chart enthaltenen Werte realisierbar sind.

Der automatische Slide-Screw-Tuner

Der automatische Slide-Screw-Impedanztuner arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie die manuelle Variante. Anstelle der manuellen Einstellung der Impedanz werden Motoren zur präzisen Positionierung der Sonde eingesetzt. Durch die Automatisierung ist eine Vor-Charakterisierung des Tuners möglich. Darunter versteht man die Zuordnung von Streuparametern (S-Parametern) zu den physischen X- und Y-Positionen der Sonde.

Damit lässt sich eine Tabelle erstellen, mit der bestimmt werden kann, wie die gewünschte Impedanz für den Prüfling wird. Für die Messung der S-Parameter wird ein

kalibrierter Netzwerkanalysator (VNA) zusammen mit einer Automatisierungssoftware eingesetzt. Dabei werden die S-Parameter als Funktion der Messsondenposition ermittelt. Die Positionen werden normalerweise so gewählt, dass das Smith-Chart komplett abgedeckt wird (Bild 2).

Moderne Impedanztuner sind eine effiziente Methode für den Test und das Design auf Komponenten-, Schaltkreis- oder Systemebene. Impedanztuner können im Rahmen der Verstärkerentwicklung die ideale Impedanz für unterschiedliche Parameter festlegen: Leistung, Verstärkung, Wirkungsgrad oder Rauschfaktor. Zudem lassen sich Modelle entwickeln, indem Messungen mit von 50 Ohm abweichenden Impedanzen in Compact-, Datenbank- oder Verhaltensmodelle eingebunden werden.

Mobiltelefone, Funkgeräte und Transceiver testen

Weiterhin ist der Einsatz für die Validierung von Modellen möglich, wobei die simulierten Leistungsergebnisse mit den tatsächlichen Messdaten abgeglichen werden. Ebenso kann die Leistung eines angepassten Prüflings als Funktion der Fehlanpassung getestet werden. Hierbei wird die Leistungsverschlechterung in Abhängigkeit davon gemessen, wie stark die Anpassung von 50 Ohm abweicht. Somit lassen sich komplette Geräte wie Mobiltelefone, Funkgeräte und Transceiver testen.

Beim skalaren Load-Pull werden automatische Impedanztuner eingesetzt, um die Impedanz einzustellen, welche als Quelle und/oder Last für den Prüfling fungiert. Dabei dient ein skalares Leistungsmessgerät als zentrales Messinstrument. Die Leistung wird in Bezug auf die Referenzebene des Leistungssensors gemessen und dann mathematisch auf die Referenzebene des Prüflings umgerechnet. Dabei werden die passiven Verluste zwischen Leistungssensor und Prüfling berücksichtigt, einschließlich des Tuner-Verlusts, der sich in Abhängigkeit von der Impedanz und der Position der Messsonde ändert.

Beim Leistungssensor handelt es sich um ein Breitband-Gerät, das den gesamten Leistungsbereich, einschließlich der Grund- und der harmonischen Frequenzen, erfasst. Mit einem Spektrumanalysator oder alternativ Multiplexer mit mehreren Leistungssensoren lassen sich spezifische frequenzbezogene Leistungswerte messen.

Außerdem lässt sich die Leistung bei Intermodulationsfrequenzen messen, wenn Zweitonsignale eingesetzt werden. Abhängig von der Signalquelle und vom Spektrumanalysator sind unterschiedliche Signaltypen möglich: darunter CW = Continuous Wave, gepulstes CW, Einton-, Zweiton- und/oder modulierte Signale, sowie die zugehörigen Messparameter.

Wenn ein Vector-Receiver für das Load-Pull verwendet wird

Beim Vector-Receiver-Load-Pull kommen ebenfalls automatische Impedanztuner zum Einsatz. Allerdings wird anstelle eines skalaren Leistungsmessgeräts ein Vector-Receiver verwendet, meist ein Vector-Network-Analyzers, um die a- und b-Wellen von

Vektoren, bezogen auf die Referenzebene des Prüflings, zu messen. Dazu wird der Receiver-Eingang mit Kopplern mit niedrigem Verlust verbunden, die sich zwischen Tuner und Prüfling befinden, und das System wird bezogen auf die Referenzebene des Prüflings kalibriert.

Für jede Frequenz werden a_1 , b_1 , a_2 und b_2 gemessen. Anhand der Vektoren können die verfügbare und die bereitgestellte Eingangsleistung, Ausgangsleistung, die Messumformer- und Leistungsverstärkung, der Wirkungsgrad und die echte zusätzliche Nutzleistung berechnet werden.

Da mit Bezug auf die Referenzebene des Prüflings kalibriert wurde, lassen sich die Großsignal-Eingangsimpedanz in Echtzeit und Fehlanpassung messen sowie Schwingungen überwachen ($\Gamma_{in} > 1$). Zusätzlich können die Tuner genauer berücksichtigt werden, indem die Impedanz am Prüfling gemessen wird. Vorteil: man muss sich nicht auf die vorkalibrierten Impedanzen und Verluste verlassen.

Da sich die Messungen auf die Prüflings-Referenzebene beziehen, sinkt die Gefahr für Messfehler. Einige VNAs unterstützen nichtlineare VNA-Messungen, einschließlich Laufzeit-Spannungs- und Stromwellenformen sowie Belastungskennlinien.

Wie sich passives Load-Pull umsetzen lässt

Passives Load-Pull lässt sich mit mechanischen Slide-Screw-Tunern umsetzen, wobei ein Teil des Signals zurück zum Ausgang des Prüflings reflektiert wird. Allerdings ist die Impedanz am Prüfling, die Gamma-Last, als Verhältnis zwischen dem reflektierten Signal a_2 und dem weitergeleiteten Signal b_2 definiert. Wenn durch die Einstellung der Messsonde am Tuner Größe und Phasenwinkel des reflektierten a_2 -Signals geändert werden, dann ändern sich Größe und Phasenwinkel der Impedanz am Prüfling.

Beim aktiven Load-Pull wird kein passiver Tuner eingesetzt, um das Signal zum Prüfling zurück zu reflektieren. Das Signal wird entweder in Größe und Phase angepasst und zurückgeführt, oder es wird abgeschlossen, und ein neues Signal wird zum Prüfling zurück übertragen. Eine separate Signalquelle ist nicht erforderlich. Aktives Open-Loop-Load-Pull lässt sich einfach implementieren und steuern; Schwingungen treten bei dieser Methode kaum auf.

Für die Ergebnisse sind zusätzliche Signalquellen und große Verstärker notwendig. Außerdem kann einfach und in Kombination mit passiven Tunern die harmonische Impedanz gesteuert werden.

Breites Frequenzband beim aktiven Mixed-Signal-Load-Pull

Aktives Mixed-Signal-Load-Pull ist eine Erweiterung des aktiven Open-Loop Load-Pull, wobei ein neues Signal erzeugt wird, welches die Gleichung $\Gamma = a_2/b_2$ erfüllt. Allerdings wird anstelle einer Einzelfrequenz oder einer Anzahl harmonischer Frequenzen ein breites Frequenzband betrachtet, wie es der Modulationsbreite eines

realistischen Kommunikationssignals entspricht.

Mit einem Breitband-AWG und A/D-Wandler lässt sich die Impedanz am Prüfling über eine Bandbreite von 240 MHz steuern. Somit kann das aktive Load-Pull-Verfahren für modulierte Signale sowie Einton- und Zweiton-CW-Signale und gepulste CW-Signale einsetzen. Außerdem lassen sich phasenverzögerungseffekte im Messsystem kompensieren, welche die HF-Leistung verschlechtern.

Erzeugte und analysierte Breitbandsignale lassen sich auch für Eintonsignale verwenden. Dabei wird das Signal über die Zeit aufgeteilt und ein Datensatz, der normalerweise nur die Wellenmodulation für eine einzige modulierte Impedanz enthalten würde, kann mehrere Wellengrößen und Phasen umfassen, die vielen Eintonimpedanzen entsprechen. So lässt sich ein Load-Pull für 1000 Impedanzen oder Leistungszuständen pro Minute durchführen.

Harmonische Frequenzen beim Harmonic-Load-Pull

Das Harmonic-Load-Pull ist ein erweitertes Load-Pull. Hier wird nicht nur die Impedanz der Grundfrequenz gesteuert, sondern auch die der harmonischen Frequenzen. Die Messmethoden des Harmonic-Load-Pull variieren in Abhängigkeit von der Load-Pull-Methode. Das passive Harmonic-Load-Pull lässt sich mit mehreren Tunern erreichen, wobei einer pro Frequenz verwendet wird.

Getrennt werden sie durch einen Multiplexer. Eine zweite passive Methode ist die Kaskadierung von Tunern sowohl intern als auch extern, wobei die Anzahl der Tuning-Messsonden der Anzahl der gesteuerten harmonischen Frequenzen entspricht. In diesem Fall werden die individuellen Positionen der verschiedenen Messsonden mathematisch bestimmt, so dass die Vektoraddition bei allen Frequenzen zu den erforderlichen Impedanzen führt.

Sollen die Prüflinge vormagnetisiert werden, dann kann ein beliebiges Gleichstromnetzteil verwendet werden. In einigen Fällen ist eine konstante Gleichstromvormagnetisierung ausreichend. Allerdings gibt es auch Anwendungsfälle, wo diese Lösung nicht optimal ist. Wenn ein Bauteil mit einem gepulsten CW-Signal betrieben wird, dann wird der von der Spannungsquelle gezogene Strom durch den HF-Impuls moduliert.

Ist das der Fall, so muss die Vormagnetisierung am Scheitelpunkt des Impulses mithilfe eines Oszilloskops gemessen werden. Eine weitere Option ist die gepulste Vormagnetisierung während der Einschaltzeit. Hier kann der Anwender nicht nur auf ein Oszilloskop verzichten, sondern die Gesamttemperatur des Prüflings bleibt während des Vorgangs niedriger.

* Gary Simpson ist Spezialist für Noise Parameter Measurement bei Maury Microwave Corp. Dr. Maximilian Tschernitz ist Spezialist für HF-Themen, insbesondere für

Load-Pull bei bsw TestSystem & Consulting.

Copyright © 2017 - Vogel Business Media