

Ein Tastendruck genügt, um mit dem Thermischen Leistungsmesser NRS Leistungen zwischen 0,1 und 330 mW zu messen. Angezeigt wird streng effektiv die Leistung beliebiger Frequenzen (bis 13 GHz), aber auch von NF sowie Gleichstromleistung. Je nach Verwendungszweck läßt sich ein Meßkopf in 50- oder 60- Ω -Ausführung anschließen.

Thermischer Leistungsmesser NRS

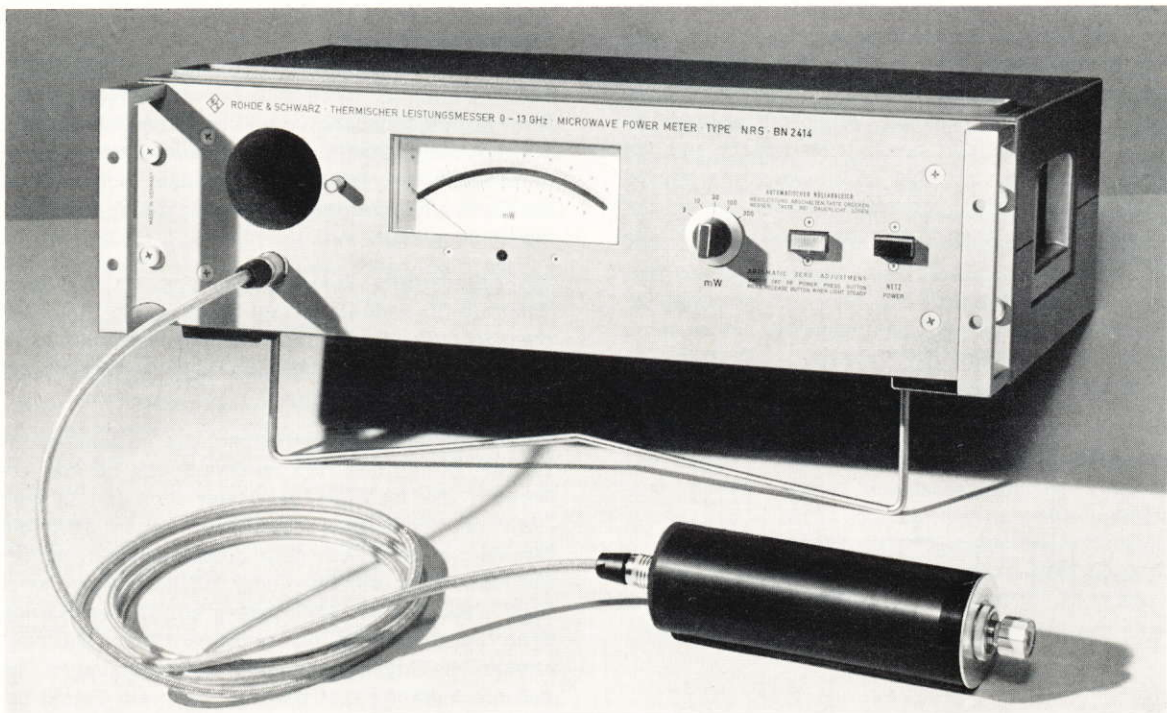


Bild 1 Der neue Thermische Leistungsmesser NRS für 0 bis 13 GHz.

Foto 17 875

Für die vier thermischen Leistungsmesser NRD BN 2412/50 und /60 sowie 2413/50 und /60, die sich im Wellenwiderstand und im Leistungsbereich unterscheiden, gibt es nun nur noch einen Nachfolger: den universellen NRS (BN 2414) mit Meßköpfen in 50- oder 60- Ω -Ausführung (Bild 1). Eine Zugehörigkeit des Meßkopfes zu einem bestimmten Gerät besteht nicht. Die Empfindlichkeit der Meßköpfe einerseits und die des Grundgeräts andererseits ist normiert und wird für jedes Gerät sowie für jeden Meßkopf unabhängig voneinander eingestellt.

Der neue Leistungsmesser weist gegenüber seinen Vorgängern folgende Verbesserungen auf:

- ▷ Größerer Frequenzbereich: 0 bis 13 GHz, durch Dezifix-A-Stecker an den Meßköpfen. Ein mitgelieferter Umrüstsatz erlaubt eine schnelle Umstellung auf den B-Stecker, wobei allerdings die oberste Meßfrequenz auf 4 GHz zurückgeht.
- ▷ Größerer Leistungsbereich: 0,1 bis 330 mW (beide Vorgänger zusammen reichten von 0,1 bis 200 mW).

- ▷ Kürzere Einstellzeit: ≤ 10 s für 100% $\pm 2\%$ der Anzeige, gegenüber 60 s für 0 bis 95% der Anzeige bei den Vorgängern.
- ▷ Einfachere Bedienung: Der NRS enthält nur noch einen einzigen Regler, der von einem Motor mit Unterersetzung feinfühlig betätigt wird. Ein Tastendruck genügt, um eine Abgleich-Automatik auszulösen. Eine Blinklampe zeigt an, wann das Gerät abgeglichen ist.
- ▷ Höhere Meßgenauigkeit durch Zusatzgeräte. Ohne Zusatzgeräte ist das neue Gerät etwa so genau wie die Eichleistungsquelle der beiden Vorgängertypen.
- ▷ Programmierbarkeit: An der Rückseite hat der NRS einen Meßausgang für Analog/Digital-Umsetzer sowie einen Eingang für die Fernauslösung des automatischen Nullabgleichs. Dank der hervorragenden Linearität braucht der Bereichsschalter nicht vom Programm gesteuert zu werden.

Prinzip der kalorimetrischen Leistungsmesser

Der NRS gehört wie seine Vorgänger NRD zu den trockenkalorimetrischen Leistungsmessern. Sie zeichnen sich besonders dadurch aus, daß keine untere Frequenzgrenze besteht und daher Abgleich und Eichung mit Gleichstrom erfolgen können.

Am Ende einer koaxialen Leitung liegt ein sehr kleiner Abschlußwiderstand. Seine Erwärmung durch die zugeführte Leistung wird durch temperaturabhängige Widerstände (in Brückenschaltung) ausgewertet. Dieser Temperaturfühler befindet sich außerhalb des koaxialen Systems. Es besteht weder eine elektrische noch eine magnetische Kopplung. Um den Einfluß der Raumtemperatur zu reduzieren, enthält der Meßkopf einen weiteren Temperaturfühler, der die Eigentemperatur in den anderen Zweig der Brückenschaltung eingibt.

Die Leistungsmesser NRD zeigten die Brückenverstimmung, die durch die Meßleistung über die thermische Kopplung hervorgerufen wurde, über einen empfindlichen Differenzverstärker an einem Instrument an.

Wirkungsweise und Aufbau des NRS

Die bestechenden Eigenschaften des neuen Leistungsmessers entstanden durch eine konsequente Weiterentwicklung des beschriebenen Meßprinzips. Der symmetrisch aufgebaute Meßkopf enthält zwei koaxiale

Abschlußwiderstände R_1 und R_2 , die mit den temperaturabhängigen Widerständen R_1' und R_2' in thermischem Kontakt stehen (Bild 2). Zwei gleiche Präzisions-Drahtwiderstände R bilden zusammen mit R_1' und R_2' eine Brückenschaltung, die mit der Gleichspannung U betrieben wird. An der Brückendiagonale ist ein hochempfindlicher Regelverstärker angeschlossen, der die kleinsten Verstimmungen der Brücke wahrnimmt und in kräftige Ausgangssignale umwandelt. Diese Signale werden dem Abschlußwiderstand R_2 zugeführt. Über die thermische Kopplung von R_2 und R_2' entsteht eine Regelschleife.

Angenommen, ein Meßsignal beliebiger Frequenz erwärmt den Widerstand R_1 . Dadurch wird über die thermische Kopplung von R_1 und R_1' die Brücke verstimmt und der Regelverstärker angesteuert. Sein Ausgangssignal erreicht R_2 und wird ebenfalls in Wärme umgesetzt. Dieser Vorgang verringert die Brückenverstimmung wieder. Bei sehr großer Verstärkung genügt ein äußerst kleines Eingangssignal am Regelverstärker, um das notwendige Ausgangssignal zu erzeugen.

Wenn die Brückenverstimmung praktisch ganz aufgehoben ist, bedeutet das, daß die beiden temperatur-

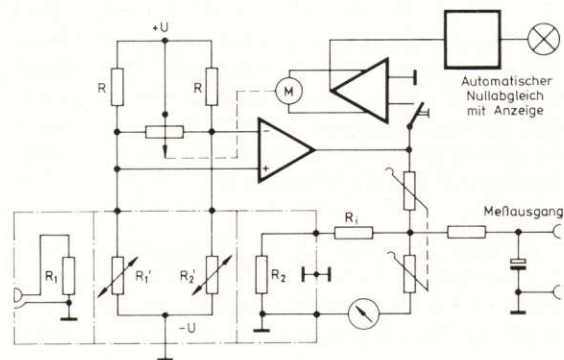


Bild 2 Prinzipschaltbild des Leistungsmessers NRS.

abhängigen Widerstände R_1' und R_2' gleiche Über-temperatur haben. Bei völliger Symmetrie des Meßkopfes sind also auch die Wärmeleistungen und damit die elektrischen Leistungen an R_1 und R_2 einander gleich. Das Signal an R_2 aber ist eine Gleichspannung, die mit wenig Aufwand an einem Instrument angezeigt werden kann. Außerdem eignet sie sich zum Steuern extern angeschlossener Schreiber.

Für die Praxis ist eine völlige Symmetrie der Abtastsysteme nicht zu erreichen. Durch das unsymmetrische

Temperaturgefälle stellt der Regelverstärker am Vergleichs-Abschlußwiderstand R_2 eine Leistung ein, die größer oder kleiner ist als die am Meßabschlußwiderstand R_1 , damit trotzdem ein Brückengleichgewicht entsteht. So ist das Signal an R_2 nicht gleich dem an R_1 , sondern lediglich proportional. Der Proportionalitätsfaktor, eine Konstante, wird durch den mechanischen Aufbau gegeben. Um aus dieser Proportionalität eine Gleichheit zu machen, enthält jeder Meßkopf ein Potentiometer, an dem sich seine Empfindlichkeit einstellen läßt. Ein zweites Potentiometer dient dem Vorabgleich der Brücke. Diese Vorkehrungen ermöglichen einen Austausch der Meßköpfe untereinander.

Da die Empfindlichkeit also durch den mechanischen Aufbau gegeben und somit konstant ist, konnte bei dem NRS auf eine Eichleistungsquelle verzichtet werden und der Stellknopf für die Empfindlichkeit (Nach-eichen) weggelassen.

Die Anwendung dieser Regelschaltung bringt zusätzlich noch eine Beschleunigung der Anzeige. Die Trägheit (Zeitkonstante) des thermischen Systems R_2/R_2' im Gegenkopplungsweig kompensiert die Trägheit des Meßsystems R_1/R_1' . Eine sorgfältige Abstimmung der Proportional- und Differentialanteile des PID-Reglers gewährleistet ein günstiges Einschwingverhalten. Die Totzeit, durch thermische Laufzeit bedingt, läßt schließlich keine weitere Verbesserung mehr zu.

Der Regelverstärker ist mit zwei integrierten Operationsverstärkern bestückt, die dazu beigetragen haben, die Frontplatte von Stellknöpfen frei zu halten. Die hervorragenden Daten für die Eingangsspannungsdrift (Temperaturabhängigkeit) erübrigen einen Nullabgleich des Regelverstärkers.

Der letzte Stellknopf für den Brücken-Nullabgleich konnte dadurch fortfallen, daß er als Motorpotentiometer in das Gerät hineingebaut wurde. Eine Drucktaste mit Signallampe löst die Automatik aus. Die Ausgangsspannung des Regelverstärkers gelangt dabei zu einem eigenen Verstärker, der den Motor und damit das Potentiometer steuert. Der Verstärker hat ein ähnliches Verhalten wie ein Fenster-Diskriminator. Die Drehrichtung des Motors hängt davon ab, ob die Spannung unter oder über dem Bereich des Fensters liegt. Das Potentiometer besorgt den Feinabgleich der Brückenschaltung am Eingang des Regelverstärkers. Durch diese Verknüpfung entsteht eine weitere Regelschleife, die selbsttätig dafür sorgt, daß die Ausgangsspannung des Hauptverstärkers zwischen zwei vorgegebenen Grenzen liegt. Sie wurden in unmittelbarer Nähe des Instrument-Nullpunktes gewählt.

Ein instabiler Multivibrator bringt die Signallampe in der Taste für den automatischen Nullabgleich zum Blinken. Eine einfache Schaltung wertet die Bewegungen des Motors gemäß dem Ein-Aus-Verhältnis seines Stromes aus und errechnet in Abhängigkeit des ein-

gestellten Leistungsbereiches den Zeitpunkt, zu dem die Nullpunkttafel vernachlässigbar ist. Dann schaltet sie die Lampe auf Dauerstrom. Der Abgleichvorgang läuft unabhängig davon weiter. Das hat den Vorzug, daß auch in den hohen Meßbereichen der Abgleich gut ist, sofern die Taste nicht sofort gelöst wird. Man kann anschließend ohne neues Warten auch in den niedrigen Bereichen messen.

Linearität

Die verwendete Regelschaltung enthält im Rückkopplungsweig ein nichtlineares Übertragungsglied. Das Signal wird am Abschlußwiderstand R_2 quadriert, weil der Brückenwiderstand R_2' auf die Wärmeleistung von R_2 anspricht. Das System R_2/R_2' stellt einen Wandler dar, der am Brückenausgang eine Spannung abgibt, die proportional dem Quadrat der angebotenen Spannung an R_2 ist. Diese Quadrierung ist einerseits erwünscht, denn sie kompensiert die Quadrierung am Meßwandler R_1/R_1' , andererseits wirkt sie sich aber nachteilig auf die Linearität des gesamten Systems aus. Kleine Signale an der unteren Meßgrenze werden etwa um 40 dB mehr gedämpft als große Signale, die der Meßkopf gerade noch trägt. Das heißt, daß sich die Schleifenverstärkung (Gegenkopplungsgrad) über den Aussteuerungsbereich um 40 dB ändert. Dies ist deshalb so wichtig, weil der Regelrest, der die Linearität bestimmt, näherungsweise umgekehrt proportional der Schleifenverstärkung ist. Das bedeutet einen etwa hundertmal größeren Regelrest an der unteren Meßgrenze als an der oberen Grenze. Die praktische Dimensionierung erfordert deshalb einen Regelverstärker mit integrierendem Verhalten.

Die Leerlaufverstärkung bei der Frequenz Null wurde mit 170 dB so hoch gewählt, daß auch bei den kleinsten Signalen ein vernachlässigbarer Regelrest auftritt. Das Gerät erhielt durch dieses Konzept eine außerordentliche Linearität. Das Anzeige-Instrument (Klasse 0,5) mit spiegelunterlegter Skala stellt hinsichtlich der Linearität das schwächste Glied der Übertragung dar, obwohl es den gesamten Aussteuerungsbereich in fünf Meßbereichen verarbeitet.

Ergebnisse

Die Ausschläge am Instrument sind spannungsproportional. Durch die Eichung der Skala in Leistungseinheiten entsteht eine Wurzelskala. Sie dehnt den unteren Bereich und staucht den Bereich in der Nähe des Vollausschlages um den Faktor 2. Auf eine Entzerrung der Skala wurde bewußt verzichtet. Eine Diodenmatrix beispielsweise hätte zwar eine bessere Ausnutzung des Instruments durch Dehnung des oberen Skalenteils bewirkt, aber gleichzeitig neue Fehler verursacht. Der Meßfehler von $< \pm 1,5$ bis $\pm 2,3\%$ v. M., für den sich nicht überlappenden Teil

der Skala, wird ohnedies den meisten Anforderungen gerecht.

Eine deutliche Verbesserung der Anzeige ist nur von einem digitalen System zu erwarten. Deshalb läßt sich an den Schreiber Ausgang des NRS das Ziffernvoltmeter UGZ anschließen (Bild 3). Diese Gerätekombination bietet eine beachtliche Meßgenauigkeit. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß sich der Fehler verdoppelt, wenn aus der angezeigten Spannung E_s die Leistung berechnet wird:

$$N = \frac{1}{Z} \left(\frac{E_s}{2} \right)^2 = \frac{E_s^2}{4Z}$$

Die Gleichspannung am Schreiber Ausgang des NRS ist der Meßkopf-Eingangsspannung proportional. Damit stellt der Leistungsmesser gleichzeitig einen AC/DC-Converter hoher Genauigkeit dar. Der im Vergleich zu solchen Geräten relativ niedrige Eingangswiderstand (50 bzw. 60Ω) unterliegt einer Toleranz von weniger als $\pm 1\%$ bei Gleichstrom. Wegen dieser Toleranz des Eingangswiderstandes ist die Klemmenspannung U von Meßkopf zu Meßkopf verschieden, die Ausgangsspannung E_s am Gerät jedoch bei allen Meßköpfen gleich (unabhängig von der Stellung des NRS-Bereichsschalters), und zwar wurde sie gleich der Ursprungung E des Generators gewählt, was für die Substitutionsmethode von großer Bedeutung ist. Diese Methode wird bei besonders hohen Anforderungen an die Meßgenauigkeit angewendet. Hierbei ist es außerdem von Vorteil, daß der Leistungsmesser NRS keine untere Frequenzgrenze hat, denn so läßt sich die zu messende Leistung durch eine Leistung der Frequenz Null ersetzen. Gleichspannungen sind, je nach Aufwand, äußerst genau zu bestimmen.

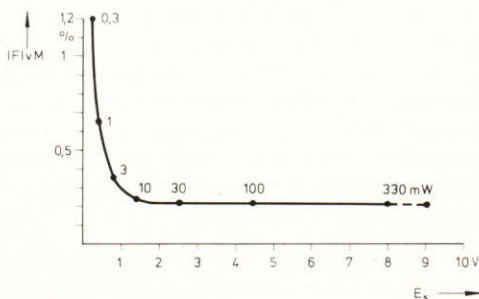
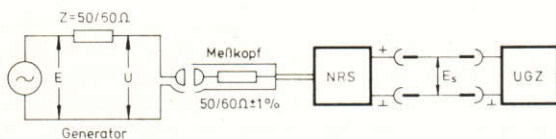


Bild 3 Oben: Meßaufbau mit Leistungsmesser NRS und Ziffernvoltmeter UGZ. Unten: Maximaler Fehler (bezogen auf den Meßwert) der am UGZ angezeigten Ausgangsspannung E_s bei Umgebungstemperaturen zwischen 15 und 35°C . Die Fehler des UGZ, einschließlich der Alterung seiner Referenz-Spannungsquelle, sind inbegriffen.

Über einen definierten Innenwiderstand (engtolerierter Drahtwiderstand) erhält man genau bekannte Leistungen.

Es soll zum Beispiel die Leistung x eines Meßsenders auf einen vorgegebenen Wert eingestellt werden (Bild 4). Während zunächst der Meßkopf mit der Normal-Leistungsquelle verbunden ist, zeigt das Gleichstrommillivoltmeter UVG den NRS-Umwandlungsfehler $E_s - E$ an (wenige Millivolt). Nach dem Um-

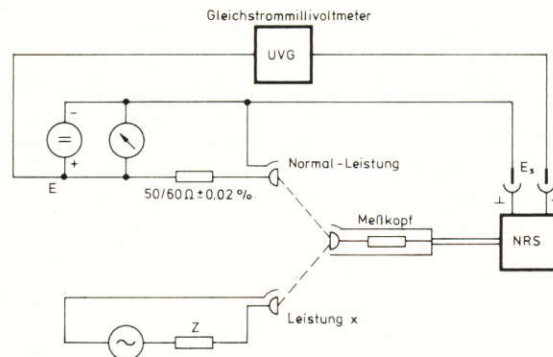


Bild 4 Leistungsmessung nach der Substitutionsmethode.

kuppeln des Meßkopfes an den Meßsender stellt man dessen Ausgangspegel so ein, daß das UVG den vorherigen Wert wieder erreicht. Der absolute Fehler (auf den Spannungswert E bezogen), den der NRS bei dieser Methode verursacht, liegt unter ± 1 mV. Bei einer mittleren Leistung von beispielsweise 100 mW an 50Ω läßt sich also ein Meßfehler (auf die Leistung bezogen) $< 0,044\%$ realisieren. Damit eignet sich der Meßaufbau auch zum Abgleichen von Leistungsmessern mit Trennkondensator am HF-Eingang.

H. Sonnberger

Kurzdaten des Thermischen Leistungsmessers NRS

Leistungsmeßbereich	0,1 ... 330 mW
Frequenzbereich	0 ... 13 GHz
Wellenwiderstand	wahlweise 50 oder 60Ω
Einstellzeit	≤ 10 s für $100\% \pm 2\%$ der Anzeige
Meßfehler	$< 2,3\%$ v. M.