

XIII Kalibrieren von HF-Leistung und HF-Spannung

XIII Kalibrieren von HF-Leistung und HF-Spannung	1
XIII.1 Ausgangsleistung von HF-Generatoren / Quellen	1
XIII.1.1 Messverfahren	1
XIII.1.2 Rückführung und Historie	3
XIII.1.3 Messunsicherheitsbudget	6
XIII.1.4 HF-Leistung – relativer Kalibrierungsfaktor, Frequenzgang	7
XIII.1.5 Erweiterung auf Kalibrierung der Absolutanzeige der HF-Ausgangsleistung an Z_0	7
XIII.1.6 Kalibrieren von HF-Spannungsquellen	8
XIII.1.7 2,92mm-Konnektor	9
XIII.1.8 Rechenbeispiele	9
XIII.1.8.1 HF-Leistung, P_{Z_0} und absoluter Kalibrierungsfaktor	9
XIII.1.8.2 HF-Spannung, U_{Z_0} Bestimmung aus P_{Z_0}	9
XIII.1.8.3 Kalibrierungsfaktor $K_{2,rel}$	9
XIII.1.8.4 Oszilloskopkalibrator, HF-Spannung U_{Z_0} über BNC-Konnektor	9
XIII.1.8.5 Frequenzgang FU_{Z_0} über BNC-Konnektor	10
XIII.1.8.6 Ergebnistabellen	10

XIII.1 Ausgangsleistung von HF-Generatoren / Quellen

Mit den HF-Leistungsmessköpfen Rohde & Schwarz NRV-Z1 und NRV-Z51 steht die Möglichkeit zur direkten Messung der Leistung an HF-Generatoren oder Ausgängen gespeister passiver Komponenten (Richtkoppler, Dämpfungsglieder, Leistungsteiler, Filter) in 50Ω - Systemen zur Verfügung. Die Köpfe messen am Anzeigegerät R&S NRVD HF-Leistungen im Bereich von $1 \mu\text{W}$ bis 100 mW (NRV-Z51) bzw. 200 pW bis 20 mW (NRV-Z1) im Frequenzbereich DC bis 18 GHz bzw. 10 MHz bis 18 GHz . [1] Bei den genannten Modellen handelt es sich um das sogenannte Verifikationskit NRVC-B1, das gegenüber herkömmlichen Leistungsmessköpfen dieser Serie eine erhöhte Zahl an Abgleichpunkten für den Kalibrierfaktor besitzt und zusätzlich zur regelmäßigen Zwischen- und gegenseitiger Plausibilitätsprüfung der Leistungsreferenz Rohde & Schwarz NRVC verwendet wird.

XIII.1.1 Messverfahren

Ausgangsleistungen von HF-Quellen können mit den Leistungsmessköpfen NRV-Z1 (Prüfmittel Nr. KL18060) und NRV-Z51 (KL18059) und dem dazugehörigen Anzeigegerät NRVD (KL18054) der Firma Rohde&Schwarz direkt vermessen werden. Durch die Technologie der Abschlussensoren und deren elektronisch abgelegten Kalibrierfaktoren ist das System bereits nach Anschließen an das Grundgerät als vollständiges Leistungsmessgerät einsatzbereit. Weitere Kalibrierfaktoren oder eine zusätzliche Leistungsreferenz werden nicht benötigt, die kalibrierte Leistungsreferenz des NRVD wird jedoch zur Verifikation und Funktionskontrolle eingesetzt. Beide Leistungsmessköpfe sind für Messungen in 50Ω Systemen konzipiert und mit Typ-N-Koaxialstecker ausgestattet. Dabei ist der thermische Sensor NRV-Z51 für Präzisionsmessungen für den mittleren Leistungsbereich (100 mW bis ca. $100 \mu\text{W}$) Leistungsbereich optimiert während der Dioden-Sensor NRV-Z1 sich durch eine große Empfindlichkeit und einen hohen Dynamikbereich auszeichnet und damit für den kleinen Leistungsbereich spezifiziert ist [1]. Im sich überschneidenden Leistungsmessbereich können zwar beide Messköpfe eingesetzt werden, kleinere Messunsicherheiten sind jedoch mit dem thermischen Leistungssensor zu erwarten, mit dem über $0,1 \text{ mW}$ hervorragende und unverrauschte Ergebnisse zu erzielen sind. Dies gilt v. a. für Frequenzen $\leq 4 \text{ GHz}$, da die frequenzabhängige Abweichung des Diodenmesskopfes für Frequenzen $>4 \text{ GHz}$ einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefert. Für Frequenzen $>4 \text{ GHz}$ bei Leistungen $>1 \text{ mW}$ ist der Diodenmesskopf dahingegen nicht mehr geeignet. Die vom Labor bei Kalibrierungen genutzten Leistungsbereiche sind Tabelle XIII.1 zu entnehmen.

	Frequenzbereich	bester Leistungsmessbereich
NRV-Z1 N-Stecker 50Ω Diodenmesskopf	10 MHz bis 18 GHz	$0,1 \mu\text{W}$ bis $0,1 \text{ mW}$
NRV-Z51 N-Stecker 50Ω Thermischer Messkopf	DC bis 18 GHz	$\geq 0,1 \text{ mW}$ bis 100 mW

Tabelle XIII.1

Da die Messköpfe mit-N-Konnektoren versehen sind, sollte bevorzugt an diesen Anschlüssen gemessen werden. Andere Konnektortypen und Übergangsstücke sind durch die Veränderung des VSWR entsprechend im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Beispielsweise müssen BNC-Ausgänge adaptiert und entsprechend im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Dazu wird die durch den Adapter entstehende Unsicherheit durch Messung von zwei BNC-N und N-BNC Adaptionen abgeschätzt. Die Abweichung der Leistungsmessungen mit und ohne Doppeladapter gehen dabei mit der Hälfte in die berechnete Messunsicherheit ein. Aufwärmzeiten, Anschlussarten Betriebsbedingungen und Bedienung der Kalibriergegenstände wird gemäß den Herstellerangaben beachtet. Empfohlen wird eine Akklimatisierungszeit von >8 Stunden und Aufwärmzeiten von mindestens 2 Stunden. Ofengeheizte Signalgeneratoren sollten sogar erst nach einer Anlaufphase von mindestens 12 bis 24 Stunden kalibriert werden. Sofern erforderlich werden alle Betriebsparameter im Kalibrierschein vermerkt.

Nach dem Anschließen (Bild XIII.1) des entsprechenden Messkopfes an das ausgeschaltete Grundgerät (bevorzugt Kanal A) und die zu vermessende Quelle (50 Ω) befindet sich das Gerät bereits im Messmodus für Kanal A (sonst ist über die Taste CHANNEL der aktive Messkanal zu wechseln).

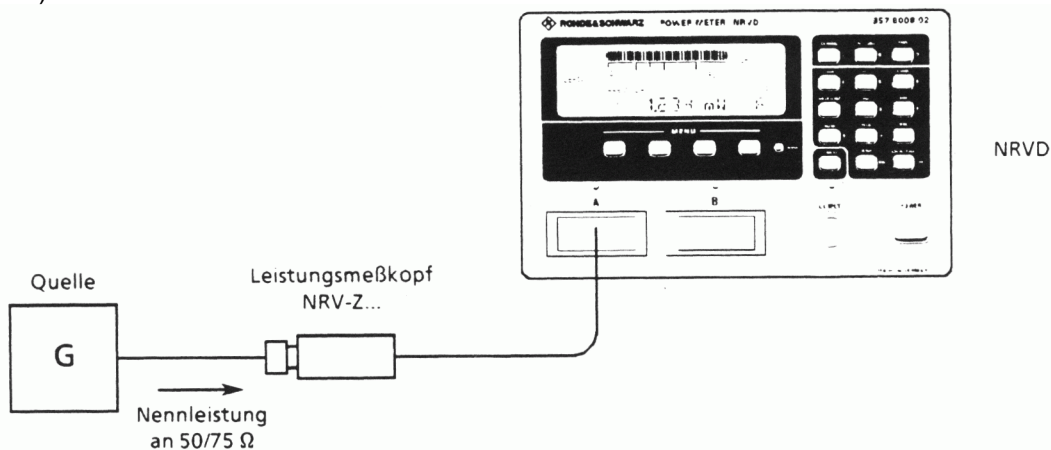


Bild XIII.1 Anschluss NRVD an HF-Leistungsquelle [2]

Durch Drücken der Taste $W \leftrightarrow dBm$ kann in der Anzeige der Messwert wahlweise in Watt (W) oder dBm ausgegeben werden. Die höchste Auflösungsgenauigkeit ist durch die Tastenkombination DISP -> RESOL -> HIGH zu aktivieren. **Da das NRVD keinen Frequenzmesser besitzt, muss - um die im Messkopf abgelegten Daten zu nutzen - die numerische Frequenzgangkorrektur des Gerätes eingeschaltet werden (Tasten FREQ -> DATA -> Eingabe der Messfrequenz in MHz oder GHz). Zum Erreichen der akkreditierten Messunsicherheiten muss die numerische Frequenzgangkorrektur bzw. der im Kalibrierschein angegebene Frequenzgang benutzt werden.**

Zur Unterdrückung größerer Anzeigeschwankungen durch verrauschte Signale verfügt das NRVD über unterschiedliche Filter, die vom Gerät automatisch durch die Tastenkombination FILTER -> AUTOMATIC eingeschaltet werden. Gemessen wird - sofern keine anderen Vorgaben vorliegen- die Absolutleistung im Modus AUTORANGE. Im Zweifelsfall werden die Angaben des Herstellers zum Anschluss und Betrieb zu Rate gezogen, befolgt und im Kalibrierschein vermerkt. Das Verfahren erfüllt die Anforderungen aus VDI/ VDE/ DGQ/ DKD 2622-Blatt 5:2003-3.2.3 für Funktionsgeneratoren [5], [7] und wird zur Kalibrierung des Frequenzganges von Funktions- und Signalgeneratoren (analog) eingesetzt.

Kalibriert und im Kalibrierschein dokumentiert wird der Kalibrierungsfaktor K_2 der Leistungsquelle bezogen auf die abgegebene Leistung bei Abschluss mit $Z_0=50 \Omega$ gilt.

$$K_2 = \frac{P_{ind}}{P_{Z_0}} \text{ mit}$$

P_{ind} : am Generator angezeigte (indicated ind.) oder eingestellte Leistung
 P_{Z_0} : Ausgangsleistung des Generators oder Quelle bei Abschluss mit Z_0 (korrigierte Anzeige am NRVD)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XIII.1 - Kalibrieren von HF- Leistungsgeneratoren und Quellen	2 von 2

Es wird also die Ausgangsleistung P_{Z0} der Quelle mit einem Leistungsmesser gemessen und mit der Anzeige der Quelle wird daraus K_2 berechnet. Am Leistungsmessgerät (Leistungssensor und Anzeigegerät NRVD) wird die einfallende Leistung P_{inc} gemessen und somit ergibt sich daraus P_{Z0} als

$$P_{inc} = P_{Z0} \frac{1}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \text{ mit } \Gamma_G \text{ und } \Gamma_L \text{ als komplexe Reflexionsfaktoren von Quelle (Generator) und}$$

Last. Mit dem Kalibrierungsfaktor des Leistungssensors $\eta_N = \frac{P_{ind.NRVD}}{P_{inc}}$ ergibt sich die

Modellgleichung zur Messung der Ausgangsleistung P_{Z0} :

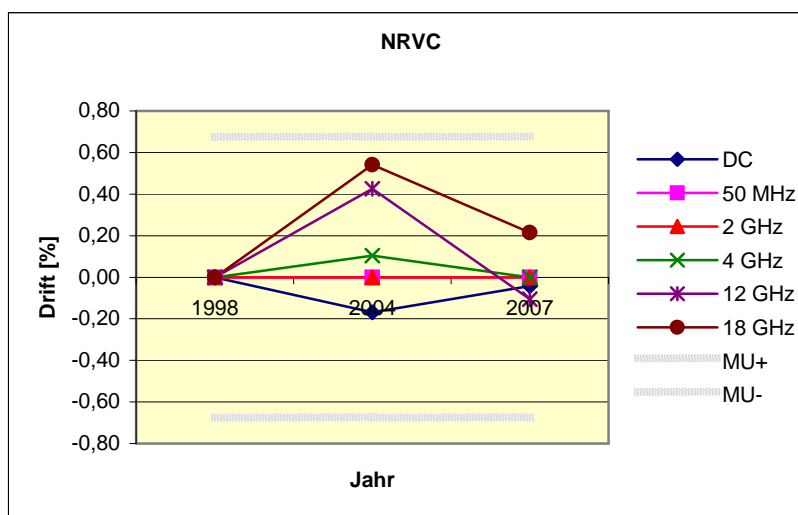
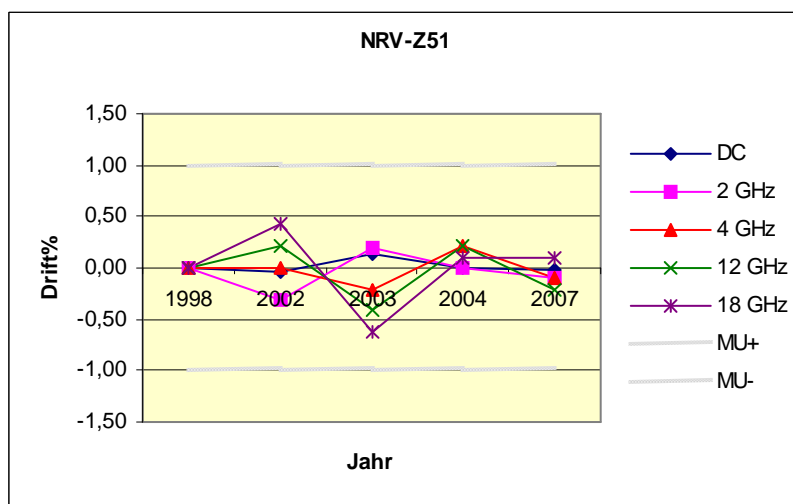
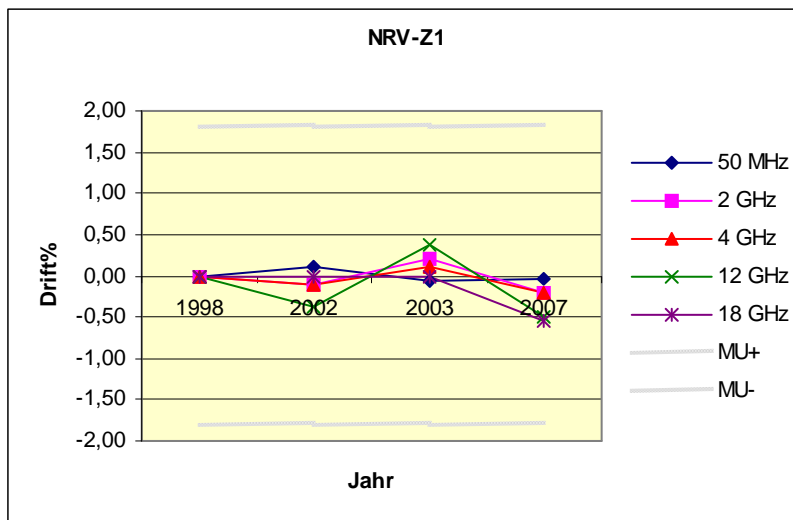
$$P_{Z0} = \frac{P_{ind.NRVD}}{\eta_N} \cdot |1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2$$

XIII.1.2 Rückführung und Historie

Die Leistungsmessköpfe werden im DKD auf Normale der PTB rückgeführt (s. Kapitel II, Intervall 36 Monate, gemäß Historie) und sind für den Wert 0 dBm im gesamten Frequenzbereich (1 kHz bis 18 GHz NRV-Z51 bzw. 10 MHz bis 18 GHz NRV-Z1) kalibriert. Neben den Messköpfen steht darüber hinaus das Kalibrierkit R&S NRVC zur Verfügung, das zusammen mit den Messköpfen im 36 monatigen Intervall ebenfalls im Herstellerlabor komplett kalibriert und abgeglichen wird (Kalibrierungsfaktoren im EEPROM, Reflexionsfaktoren, Korrekturwerte auf Diskette, etc.). Zusätzlich wird die gegenseitige Verifikation (NRV-Z an NRVC und umgekehrt) mindestens im monatlichen Intervall durchgeführt. Als weitere Gebrauchsnormale im Labor (mobiler Einsatz, sekundärer HF-Platz) dienen ebenfalls Messköpfe der Typen NRV-Z51/Z1, die somit regelmäßig am Kalibrierkit NRVC kalibriert und auf Einhaltung der Spezifikation überprüft werden können. Die durch eine Drift¹ hervorgerufene Messunsicherheit wurde auf Basis der Historie ausgewertet. Frequenzabhängig und linear ansteigend liegt diese im Bereich von 0,1 % bei 100 MHz bis 0,6 % bei 18 GHz sie wird durch einen Messunsicherheitsbeitrag p_{drift} im Budget (S. 7) berücksichtigt

¹ hauptsächlich durch Abnutzung des Steckers und nicht durch Alterung der Wandlerelemente

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XIII.1 - Kalibrieren von HF- Leistungsgeneratoren und Quellen	3 von 3



Driftauswertung der HF-Leistungsreferenzen NRV-Z1, NRV-Z51 und NRVC mit MU+/- als mittlerer Messunsicherheit der Kalibrierung.

Die für die Messköpfe ermittelten Korrekturwerte (Kalibrierfaktoren der Normale) sind im Kalibrierschein angegeben und auch direkt im EEPROM abgelegt und werden vom Grundgerät NRVD beim angezeigten Messwert berücksichtigt. Diese Werte werden nicht mehr geändert und stehen für die entsprechenden Kalibrierfrequenzen zur Verfügung. Zusätzlich ist die Linearität bei 50 MHz direkt kalibriert. Die Linearität des Messkopfes ist gemäß Herstellerangaben [1] spezifiziert, so dass mit den

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XIII.1 - Kalibrieren von HF- Leistungsgeneratoren und Quellen	4 von 4

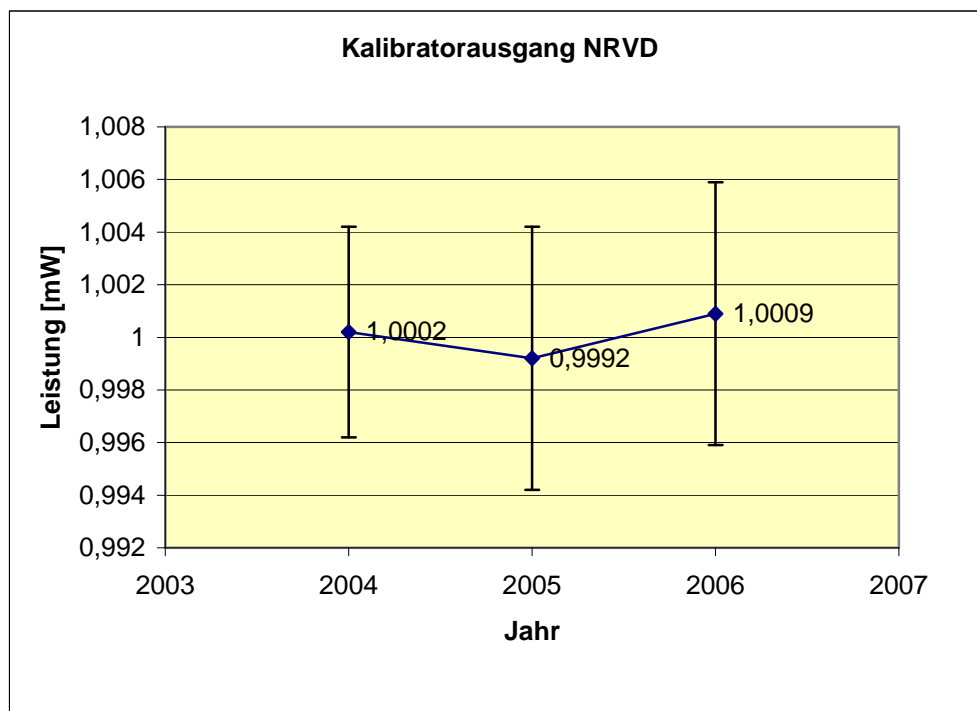
Stützwerten des Kalibrierscheines die Rückführung im gesamten Frequenzbereich der Messköpfe gewährleistet werden kann. Dabei wird aus Messungen mit einem kalibrierten 40 dB Dämpfungsglied angenommen, dass der Diodenkopf NRV-Z1 seine Linearität und Dynamik bis -40 dBm einhält und somit bereits ab 0,1 µW verwendet werden kann.

Rohde & Schwarz bezieht die Unsicherheiten und Spezifikationen der Messköpfe auf eine Absolutleistungsmessung. Um die Funktion der Absolutleistungsmessung nochmals gegenzuprüfen steht am NRVD eine kalibrierte 50 MHz, 1mW-Referenzleistungsquelle zur Verfügung, wodurch vor jeder Messung diese Genauigkeit verifiziert wird und ggf. relativ zu dieser Quelle gemessen und korrigiert werden muss.

	Frequenzbereich	kalibrierter Leistungsmessbereich
NRV-Z1 KL18060	10 MHz bis 18 GHz	-30dBm bis 0 dBm 1 µW bis <1 mW
NRV-Z51 KL18059	DC bis 18 GHz	0 dBm bis 19 dBm 1 mW bis 79 mW
NRVD KL18054	50 MHz	1 mW

Tabelle XIII.2

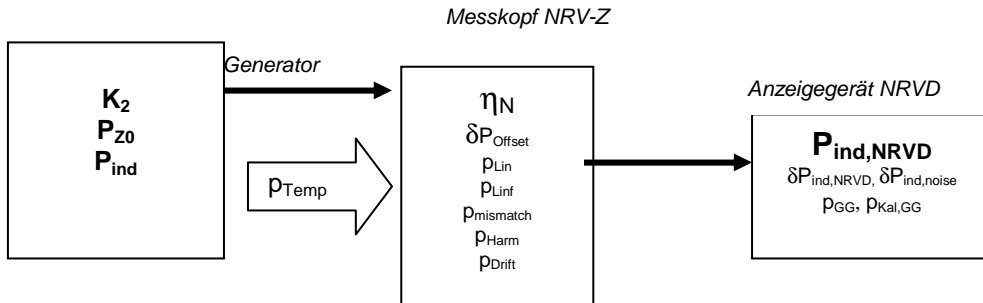
Die Historie des Kalibratorausgangs am NRVD ist im Intervall von 2 Jahren ausgewertet worden. Dabei konnten keine Abweichungen im Rahmen der Messunsicherheit festgestellt werden. Das Kalibrierintervall wird daher an die Ergebnisse der Historienauswertung angepasst.



XIII.1.3 Messunsicherheitsbudget

Skizze des Messverfahrens:

Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:



Der Wert der Hochfrequenzleistung, die die HF-Quelle an der Bezugsebene in eine ideale 50-Ω-Last abgibt, lässt sich berechnen aus der Beziehung:

$$P_{Z0} = \frac{P_{ind,NRVD} - \delta P_{ind,NRVD} - \delta P_{Offset} - \delta P_{ind,noise}}{\eta_N} \cdot P_{mismatch} \cdot P_{Drift} \cdot P_{Lin} \cdot P_{Linf} \cdot P_{Temp} \cdot P_{Harm} \cdot P_{GG} \cdot P_{Kal,GG}$$

und daraus $K_2 = \frac{P_{ind}}{P_{Z0}}$

$P_{ind,NRVD}$ angezeigter und abgelesener Messwert am HF-Leistungsmesser NRVD

η_N Kalibrierfaktor des Bezugsnormals. Bei eingeschalteter Frequenzgangkorrektur mit den Werten aus dem EEPROM der Leistungsköpfe gilt $\eta_N=1$. Die Unsicherheit des Kalibrierfaktors ist dabei dem Kalibrierschein entnehmbar (0,011 dB bis 0,058 dB).

P_{ind} am Generator/ Quelle abgelesene oder eingestellte Leistung

Gesuchte Größe:

P_{Z0} Ausgangsleistung des HF-Generators / Quelle bei Abschluss mit idealem $Z_0=50 \Omega$.

K_2 Kalibrierungsfaktor K_2 des Generators

die für die Berechnung der kleinsten angebaren Messunsicherheit des **Kalibrierungsfaktors K_2** von HF-Generatoren maßgebliche **Modellgleichung:**

$$K_2 = \frac{P_{ind} \cdot \eta_N}{(P_{ind,NRVD} - \delta P_{ind,NRVD} - \delta P_{Offset} - \delta P_{ind,noise}) P_{mismatch} \cdot P_{Drift} \cdot P_{Lin} \cdot P_{Linf} \cdot P_{Temp} \cdot P_{Harm} \cdot P_{GG} \cdot P_{Kal,GG} \cdot P_{conn}}$$

mit: $w^2(K_2) \approx w^2(P_{ind}) + w^2(\eta_N) + w^2(P_{ind,NRVD}) + \sum_i \left(\frac{\delta P_i}{P_{ind,NRVD}}\right)^2 w^2(\delta P_i) + \sum_j w^2(p_j) =$

$$w^2(K_2) \approx w^2(P_{ind}) + w^2(\eta_N) + w^2(P_{ind,NRVD}) + \sum_i \frac{1}{P_{ind,NRVD}^2} \cdot u^2(\delta P_i) + \sum_j w^2(p_j) \quad \text{da } P_{NRVD} \gg \delta P_i$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XIII.1 - Kalibrieren von HF- Leistungsgeneratoren und Quellen	6 von 6

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis K_2 beizuordnende **relative erweiterte** Messunsicherheit ($k=2$) für die Kalibrierung des Kalibrierungsfaktor K_2 für HF-Leistungsquellen:

$$W(K_2) = 2w(K_2)$$

XIII.1.4 HF-Leistung – relativer Kalibrierungsfaktor, Frequenzgang

Die Kalibrierung von HF-Generatoren kann auch eine Messung des Frequenzganges bezogen auf eine Referenzfrequenz (f_{ref}) und Leistung (i.d.R. 1 mW bei 50 MHz) beinhalten. Dabei wird der relative Kalibrierungsfaktor $K_{2,rel}$ der Ausgangsleistung der Quelle über der Frequenz als Verhältnis der Wechselleistungen bestimmt:

$$K_{2,rel} = \frac{K_2(f)}{K_2(f_{ref})} = \frac{P_{ind}(f)}{P_{Z0}(f)} \cdot \frac{P_{Z0}(f_{ref})}{P_{ind}(f_{ref})} = \frac{P_{Z0}(f_{ref})}{P_{Z0}(f)}$$

mit der relativen Unsicherheit

$$w^2(K_{2,rel}) = w^2(K_2(f)) + w^2(K_2(f_{ref}))$$

unter der Annahme, dass sich alle frequenzunabhängigen systematischen Korrekturen dann gegenseitig aufheben (siehe Tabelle und Rechenbeispiel).

XIII.1.5 Erweiterung auf Kalibrierung der Absolutanzeige der HF-Ausgangsleistung an Z_0

Gemäß Formel unterscheiden sich die Messunsicherheiten von P_{Z0} und K_2 nur um die zusätzliche Unsicherheit von P_{ind} , welche vom Messobjekt abhängt und erst im konkreten Fall berücksichtigt werden kann. Die relativen Messunsicherheiten der Absolutanzeige der HF-Leistung P_{Z0} an Z_0 können kleiner als die Messunsicherheit von K_2 sein, wenn die zusätzliche Messunsicherheit der Anzeige von P_{ind} hinreichend klein ist. In diesem Fall behält das Messunsicherheitsbudget der relativen Größe K_2 auch für die relative Messunsicherheit von P_{Z0} seine Gültigkeit. Damit gilt in diesen Fällen $W(P_{Z0}) = W(K_2)$. Die Erweiterung auf HF-Absolutleistungskalibrierung (Kalibrieren von Quellen) kann also ohne weitere Einschränkung erfolgen. Ist die zusätzliche Unsicherheit von der Anzeige von P_{ind} , jedoch nicht zu vernachlässigen, muss sie zusätzlich zu den oben genannten Unsicherheiten berücksichtigt werden.

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/genehmigt von: SF am: 08.01.2009	Kapitel XIII.1 - Kalibrieren von HF- Leistungsgeneratoren und Quellen	Seite 7 von 7
---------------------------	--	---	--	-------------------------

XIII.1.6 Kalibrieren von HF-Spannungsquellen

- Messsender
- Funktionsgeneratoren
- Oszilloskopkalibratoren

Die Kalibrierung von Funktionsgeneratoren, Oszilloskopkalibratoren oder Signalgeneratoren macht oft eine Angabe des Ausgangssignals in HF-Spannung U_{Z_0} nötig. Bei HF-Generatoren bzw. -Quellen wird die Ausgangsspannung U_{Z_0} , die vom Generator an eine angepasste Last (Z_0) erzeugte Spannung, kalibriert. Über eine Leistungsmessung, bei der die Ausgangsleistung P_{Z_0} der Quelle an Z_0 bestimmt wird, lässt sich die an einem idealen 50Ω Abschluss Z_0 anliegende Spannung errechnen, aus:

$$U_{Z_0} = \sqrt{P_{Z_0} \cdot Z_0}$$

Es wird zunächst die Ausgangsleistung P_{Z_0} bestimmt, die Messung erfolgt analog zum Verfahren von **P_{Z0} in XIII.1.1**. In einem zweiten Schritt wird die HF-Spannung U_{Z_0} gemäß der obigen Beziehung aus P_{Z_0} berechnet. Diese Umrechnung der Leistungsanzeige $P_{ind,NRVD}$ in eine Spannungsanzeige U_{ind} : $U_{ind} = \sqrt{P_{ind,NRVD} \cdot Z_0}$ erfolgt auch beim Leistungsmessgerät NRVD, wenn man die Taste „UNIT – V“ drückt. Diese Spannung U_{ind} ist aber nur exakt die Spannung am Eingang des Leistungsmessers, wenn die Eingangsimpedanz Z_{NRV} des Messkopfes NRV-Z auch exakt $50,0 \Omega$ beträgt.

- Z_0 idealer Abschlusswiderstand 50Ω
 U_{Z_0} Ausgangsspannung des HF-Generators / Quelle bei Abschluss mit idealem $Z_0=50 \Omega$.
 P_{Z_0} Ausgangsleistung des HF-Generators / Quelle bei Abschluss mit idealem $Z_0=50 \Omega$.

Die **Modellgleichung für die U_{Z_0} -Messung** lautet:

$$U_{Z_0} = \sqrt{P_{Z_0} \cdot Z_0}$$

Da Z_0 die Nominalimpedanz $Z_0 = 50 \Omega$ des Koaxialleitersystems ist, die selbst keine Unsicherheit hat, ergibt sich die relative erweiterte Messunsicherheit $W(U_{Z_0})$ unmittelbar aus der relativen erweiterten Messunsicherheit $W(P_{Z_0})$ (s. XIII.1.5) der Leistung P_{Z_0} .

Es ist aber bei der Anwendung des kalibrierten Generators zu beachten, dass die Spannung U_x , die der Generator an eine reale Impedanz Z_x abgibt stark von Z_x abhängt. (Mit $\Delta Z_x = Z_0 - Z_x$ wird $U_x \approx U_{Z_0}(1 + \Delta Z_x / Z_0)$ bei $\Delta Z_x \ll Z_0$)

Üblicherweise wird bei Spannungsgeneratoren der Frequenzgang $F_{U_{Z_0}}(f)$ gemessen mit:

$$F_{U_{Z_0}}(f) = \frac{U_{Z_0}(f)}{U_{Z_0}(f_{ref})} = \sqrt{\frac{P_{Z_0}(f)}{P_{Z_0}(f_{ref})}} = \frac{1}{\sqrt{K_{2,rel}}}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: SF am: 08.01.2009	XIII.1 - Kalibrieren von HF- Leistungsgeneratoren und Quellen	8 von 8

XIII.1.7 2,92mm-Konnektor

Analog zu den genannten Verfahren bis 18 GHz stehen für Leistungsquellen und -messungen im koaxialen Konnektorssystem 2,92mm bis 40 GHz (bzw. kompatibel 3,5mm bis 26,5 GHz) die Leistungsmessköpfe Rohde & Schwarz NRV-Z15 und NRV-Z55 zur Verfügung.

	Frequenzbereich	bester Leistungsmessbereich
NRV-Z15 2,92mm „K“ Stecker 50 Ω Diodenmesskopf	50 MHz bis 40 GHz	0,1 μW bis 0,1 mW
NRV-Z55 2,92mm „K“ Stecker 50 Ω Thermischer Messkopf	DC bis 40 GHz	≥0,1 mW bis 100 mW

Tabelle XIII.1

XIII.1.8 Rechenbeispiele

XIII.1.8.1 HF-Leistung, P_{Z0} und absoluter Kalibrierungsfaktor

0,1 μW an NRV-Z1 bei 50 MHz

XIII.1.8.2 HF-Spannung, U_{Z0} Bestimmung aus P_{Z0}

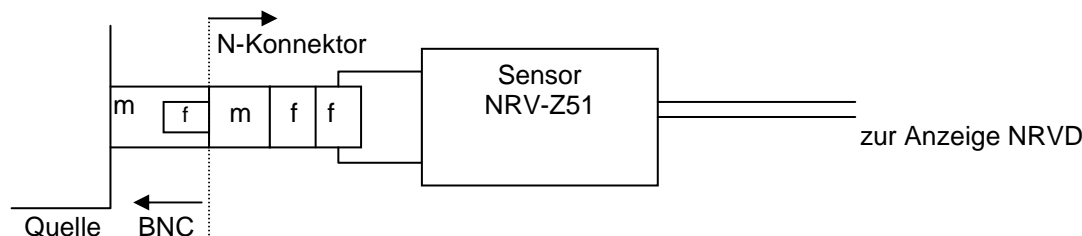
NRV-Z51, 50 MHz, 1 mW

XIII.1.8.3 Kalibrierungsfaktor $K_{2,rel}$

NRV-Z51, Referenzfrequenz $f_{ref}=50$ MHz, Testfrequenz $f=4$ GHz, 100 μW

XIII.1.8.4 Oszilloskopkalibrator, HF-Spannung U_{Z0} über BNC-Konnektor

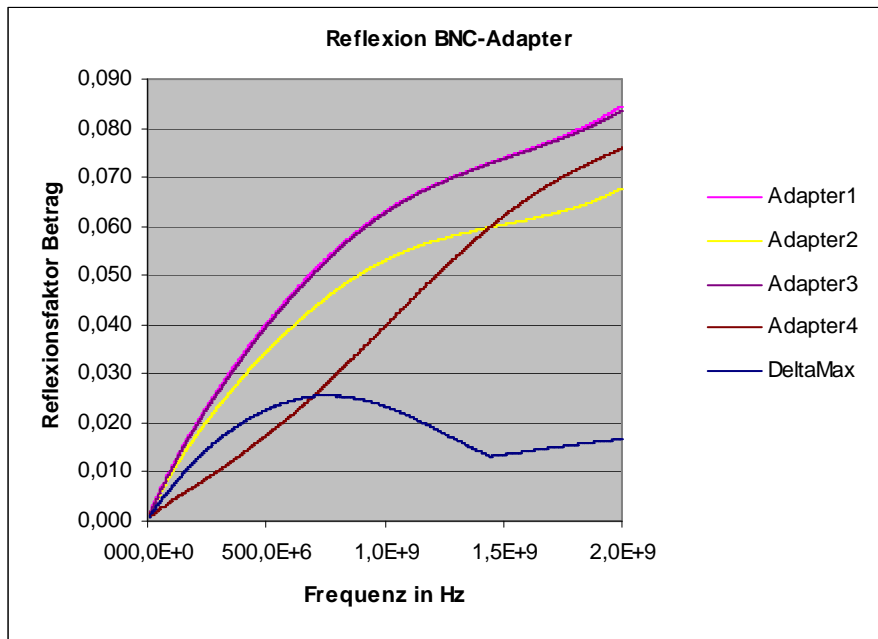
Bestimmung aus P_{Z0} , NRV-Z51, 800 MHz, 100 mV (200 μW)



In diesem Beispiel erhöht sich die Messunsicherheit aus XIII.1.3 durch die Eigenschaften des Adapters. Der verwendete Adapter wird vor der Kalibrierung als Doppelkombination am VNA ausgemessen und mit der Hälfte des gemessenen Dämpfungsverlaufs berücksichtigt. In der Regel ist dieser nahezu linear:

Adapterdämpfung: $p_{conn}(f)=0,03 \text{ dB} \cdot f / \text{GHz}$

Zur Bewertung des zusätzlichen Einflusses durch den Reflexionsfaktor wurde eine BNC-Last unter Verwendung einer Reihe guter Adapter, Typ Rosenberger BNC(f)-N(m), am VNA vermessen.



Aus den Ergebnissen wird die maximale Abweichung $\Delta\Gamma_{max,conn}$ der Messwerte untereinander in $\Gamma_L = \Gamma_{NRV-Z} + \Delta\Gamma_{max,conn}$ als Summe der Abweichung und des Sensorreflexionsfaktors mit $\Delta\Gamma_{max,conn} = 0,03$ berücksichtigt.

XIII.1.8.5 Frequenzgang FU_{Z0} über BNC-Konnektor

Bestimmung aus P_{Z0} , NRV-Z51, 1,5 GHz, 70,71 mV (100 μ W)

In diesem Beispiel ist die systematische Abweichung der Dämpfung des Adapters als Differenz $p_{conn} = p_{conn}(f) - p_{conn}(f_{ref})$ durch den Bezug auf die Referenzfrequenz zu berücksichtigen.

XIII.1.8.6 Ergebnistabellen

Größenmatrix für NRV-Z1 für HF-Leistungsmessung 0,1 μ W bis 0,1 mW

Frequenz	10MHz bis 50MHz	50 MHz bis 100 MHz	100 MHz bis 1 GHz	1 GHz bis 2 GHz	2 GHz bis 4 GHz	4 GHz bis 8 GHz	8 GHz bis 12 GHz	12 GHz bis 13 GHz	13 GHz bis 18 GHz
$P_{ind,NRVD}$ in Watt	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9
$W(K_2)$	1,7%	2,0%	2,0%	2,5%	3,8%	7,9%	8,0%	8,0%	8,0%
U_{Z0} in Volt	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3
$W(U_{Z0})$	0,4%	1,0%	1,0%	1,2%	1,9%	3,9%	4,0%	4,0%	4,0%

Größenmatrix für NRV-Z51 für HF-Leistungsmessung 0,1 mW bis 80 mW

Frequenz	DC bis 50MHz	50 MHz bis 100 MHz	100 MHz bis 2 GHz	2 GHz bis 3 GHz	3 GHz bis 4 GHz	4 GHz bis 12 GHz	12 GHz bis 12,4 GHz	12,4 GHz bis 17 GHz	17 GHz bis 18 GHz
$P_{ind,NRVD}$ in Watt	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6
$W(K_2)$	0,95%	1,1%	1,6%	1,6%	1,8%	3,0%	3,0%	3,1%	3,8%
U_{Z0} in Volt	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3
$W(U_{Z0})$	0,5%	0,6%	0,8%	0,8%	0,9%	1,5%	1,5%	1,5%	1,9%

Größenmatrix für 2,92mm-Konnektor NRV-Z15

0,1µW bis 0,1 mW	50MHz	>50 MHz bis 1 GHz	>1 GHz bis 2 GHz	>2 GHz bis 4 GHz	>4 GHz bis 12 GHz	>12 GHz bis 26,5 GHz	>26,5 GHz bis 40 GHz
Leistung in Watt	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9	100,0E-9
W(K ₂)	2,1%	2,7%	4,4%	4,5%	13,0%	13,1%	13,1%
in dB	0,09	0,12	0,19	0,19	0,53	0,53	0,54
W(K _{2,rel})	2,0%	2,7%	4,4%	4,5%	13,0%	13,0%	13,0%
U _{Z0} in Volt	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3	2,2E-3
W(U _{Z0})	1,0%	1,4%	2,2%	2,3%	6,5%	6,5%	6,6%
W(FU _{Z0})	1,0%	1,3%	2,2%	2,3%	6,5%	6,5%	6,5%

Größenmatrix für 2,92mm-Konnektor NRV-Z55

0,1mW bis 80mW	DC bis 50MHz	>50 MHz bis 1 GHz	>1 GHz bis 2 GHz	>2 GHz bis 4 GHz	>4 GHz bis 12 GHz	>12 GHz bis 26,5 GHz	>26,5 GHz bis 40 GHz
Leistung in Watt	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6	100,0E-6
W(K ₂)	1,23%	2,0%	3,2%	3,3%	6,4%	8,1%	10,6%
in dB	0,05	0,09	0,14	0,14	0,27	0,34	0,44
W(K _{2,rel})	0,8%	1,8%	3,0%	3,2%	6,3%	8,0%	10,5%
U _{Z0} in Volt	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3	70,7E-3
W(U _{Z0})	0,61%	1,0%	1,6%	1,7%	3,2%	4,1%	5,3%
W(FU _{Z0})	0,4%	0,9%	1,5%	1,6%	3,1%	4,0%	5,2%

Die übrigen Zahlenwerte der Berechnungen für die einzelnen Messgrößen sind der Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle XIII Kalibrieren von HF-Leistungsquellen.XLS“ zu entnehmen, die Ergebnisse sind im Leistungsnachweis aufgeführt.