

XIII Hochfrequenzmessgrößen

XIII.1 Ausgangsleistung von HF-Generatoren / Quellen

Mit unterschiedlichen als Gebrauchs- oder Bezugsnormal rückgeführten HF-Leistungsmessköpfen steht die Möglichkeit zur direkten Messung der Leistung an HF-Generatoren oder Ausgängen gespeister passiver Komponenten (Richtkoppler, Dämpfungsglieder, Leistungsteiler, Filter) in 50 Ω-Systemen zur Verfügung. Durch die entsprechenden Anzeigegeräte werden die Messwerte dargestellt oder über eine Schnittstelle elektronisch ausgelesen. Zur Kalibrierung dieser Leistungssensoren, aber auch zu deren Verifikation, stehen abhängig vom Konnektorsystem Verifikationstandards (z. B. NRVC oder NRPC40) mit entsprechenden Referenzsensoren zur Verfügung. Diese Referenzsensoren besitzen eine höhere Anzahl an Abgleichpunkten und werden daher auch zur regelmäßigen Verifikation und Plausibilitätsprüfung verwendet.

XIII.1.1 Messverfahren

XIII.1.1.1 Direktmessverfahren an kalibrierten Leistungsmessköpfen

Ausgangsleistungen von HF-Quellen können mit Leistungsmessköpfen wie z.B. Rohde & Schwarz NRVC-Z1 und den dazugehörigen Anzeigegeräten wie z.B. Rohde&Schwarz NRVD direkt kalibriert werden. Durch deren elektronisch abgelegten Kalibrierfaktoren sind solche Systeme bereits nach Anschließen an das Grundgerät als vollständiges Leistungsmessgerät einsatzbereit. Weitere Kalibrierfaktoren oder eine zusätzliche Leistungsreferenz werden üblicherweise nicht benötigt, können aber abhängig von der Nominalabweichung der Messköpfe individuell verwendet werden. Kalibrierte Leistungsreferenzen, wie z.B. die des Systems Rohde & Schwarz NRVC bzw. NRPC40, werden zur Verifikation und Funktionskontrolle eingesetzt. Die meisten Leistungsmessköpfe sind für Messungen in 50 Ω Systemen konzipiert und üblicherweise Koaxialsteckern ausgestattet. Dabei sind thermische Sensoren für Präzisionsmessungen meist für mittlere Leistungsbereiche (100 mW bis ca. 100 μW) optimiert, während Dioden-Sensor sich durch eine große Empfindlichkeit und einen hohen Dynamikbereich auszeichnen und damit für den kleinen Leistungsbereich spezifiziert sind. Daneben sind Mehrpfad-Leistungsmessköpfe im Einsatz, deren jeweiliger Messpfad automatisch gewählt wird und an den optimalen Arbeitsbereich angepasst ist. Im sich überschneidenden Leistungsmessbereich können zwar alle Messkopftechnologien eingesetzt werden, kleinere Messunsicherheiten sind jedoch mit thermischen Leistungssensoren zu erwarten, mit den oberhalb von 0,1 mW hervorragende und unverrauschte Ergebnisse erzielbar sind. Dies gilt v. a. für Frequenzen ≤ 4 GHz, da die frequenzabhängige Abweichung von Diodenmessköpfen für Frequenzen >4 GHz oft einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefert. Für Frequenzen >4 GHz bei Leistungen >1 mW sind Diodenmessköpfe dahingegen meist nicht mehr geeignet, um kleine Messunsicherheiten zu erzielen.

Da die Messköpfe mit festen Konnektoren versehen sind, auf die sich alle Referenzwerte beziehen, sollte bevorzugt an diesen Anschlüssen gemessen werden. Andere Konnektortypen und Übergangsstücke sind durch die Veränderung des VSWR (voltage standing wave ratio) und deren Dämpfung entsprechend, , in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen¹. Beispielsweise müssen BNC-Ausgänge adaptiert und in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Aufwärmzeiten, Anschlussarten Betriebsbedingungen und Bedienung der Kalibriergegenstände werden gemäß den Herstellerangaben beachtet, so dass angemessene Aufbewahrungszeiten unter Umgebungsbedingungen und Aufwärmzeiten bei Betrieb eingehalten werden. Sofern erforderlich, werden alle Betriebsparameter im Kalibrierschein vermerkt.

Vor dem Start der Messung erfolgen Nullpunkt- und ggf. Kalibrierfaktorkorrektur des Leistungsmesssystems (ZERO und CAL) gemäß den Angaben des entsprechenden

¹ üblich sind z. B. Charakterisierungen durch sog. Back-to-Back-Messungen, [siehe auch K:\Intranet\DKD-QS\Richtlinien - Normen\HF-Optik\METAS-Adapter-Characterization-Tutorial.pdf](#) - Dazu wird die durch den Adapter entstehende Unsicherheit durch Messung von zwei Adaptionen abgeschätzt. Die Abweichung der Leistungsmessungen mit und ohne Doppeladapter gehen dabei mit der Hälfte in die berechnete Messunsicherheit ein.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	1

Betriebshandbuchs. Nach dem Anschluss (Bild XIII.1) des entsprechenden Messkopfes an das Grundgerät und die zu vermessende Quelle (50 Ω) kann mit der Messung begonnen werden.

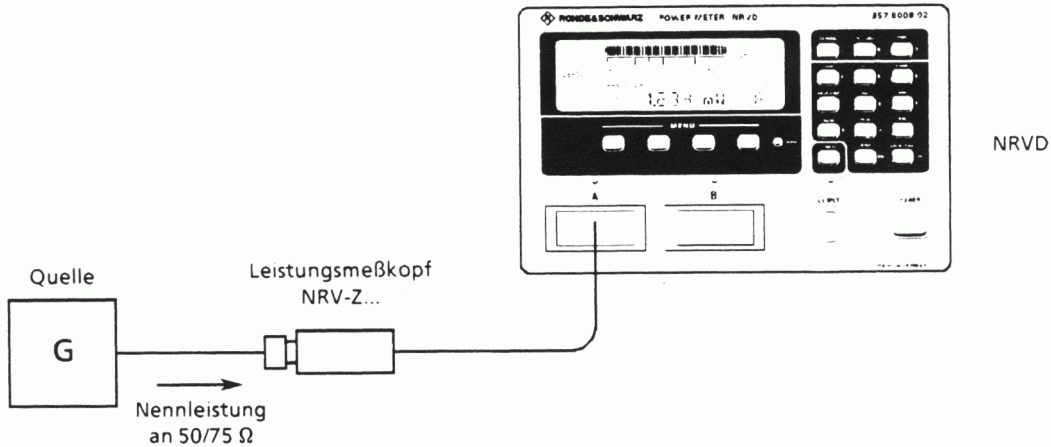


Bild XIII.1 Anschluss NRVD an HF-Leistungsquelle [2]

Die Anzeige der Messwerte erfolgt wahlweise in Watt (W) oder dBm. Dabei sind die jeweils höchste verfügbare Auflösung am Grundgerät und geeignete Filter oder Mittelwertbildung zu aktivieren. **Da das die meisten Leistungsmesssysteme keinen Frequenzmesser besitzen, muss - um die im Messkopf abgelegten Kalibrierfaktoren zu nutzen - die numerische Frequenzgangkorrektur des Gerätes eingeschaltet werden.** Im Zweifelsfall werden die Angaben des Herstellers zum Anschluss und Betrieb zu Rate gezogen, befolgt und im Kalibrierschein vermerkt. Das Verfahren erfüllt daneben die Anforderungen aus VDI/ VDE/ DGQ/ DKD 2622-Blatt 5:2014-4.2.4 für Funktionsgeneratoren sowie VDI/ VDE/ DGQ/ DKD 2622-Blatt 14.1:2015-5.2.8 und wird u.a. zur Kalibrierung des Frequenzganges von Funktions- und analogen Signalgeneratoren eingesetzt.

Kalibriert und im Kalibrierschein dokumentiert wird die absolute Ausgangsleistung oder der Kalibrierfaktor K_2 der Leistungsquelle, der das Verhältnis der am Generator angezeigten Leistung zur abgegebenen Leistung bei Abschluss mit $Z_0=50 \Omega$ darstellt

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

- 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 Leistungsmessgerät / Normal)

Kalibriergröße ist also die Ausgangsleistung P_{Z_0} der Quelle. Am Leistungsmessgerät (Leistungssensor und Anzeigegerät) wird allerdings die einfallende Leistung P_{inc} gemessen. Somit ergibt sich daraus P_{Z_0} als

$$P_{inc} = P_{Z_0} \frac{1}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \text{ mit } \Gamma_G \text{ und } \Gamma_L \text{ als komplexe Reflexionsfaktoren von Quelle (Generator) und}$$

Last (Leistungsmesskopf). Mit dem Kalibrierfaktor des Leistungssensors $\eta_N = \frac{P_{ind, Sensor}}{P_{inc}}$ ergibt

sich die **Modellgleichung zur Messung der Ausgangsleistung P_{Z_0}** :

$$P_{Z_0} = \frac{P_{ind, Sensor}}{\eta_N} \cdot |1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2$$

XIII.1.1.2 Selektive Messung am Messempfängersystem

Am einem Messempfängersystem (z.B. Agilent N5531S, bestehend aus Spektrumanalysator Agilent E4440A, passendem Sensormodul Agilent N5532B-518 oder N5532B-526 und Leistungsmessgerät Agilent N1912A, siehe XIII.5.1) können auch noch kleine Leistungen von Generatoren durch

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	2

Kombination eines Leistungsmessgeräts mit einem selektiven Spektrumanalysator sehr präzise gemessen werden.

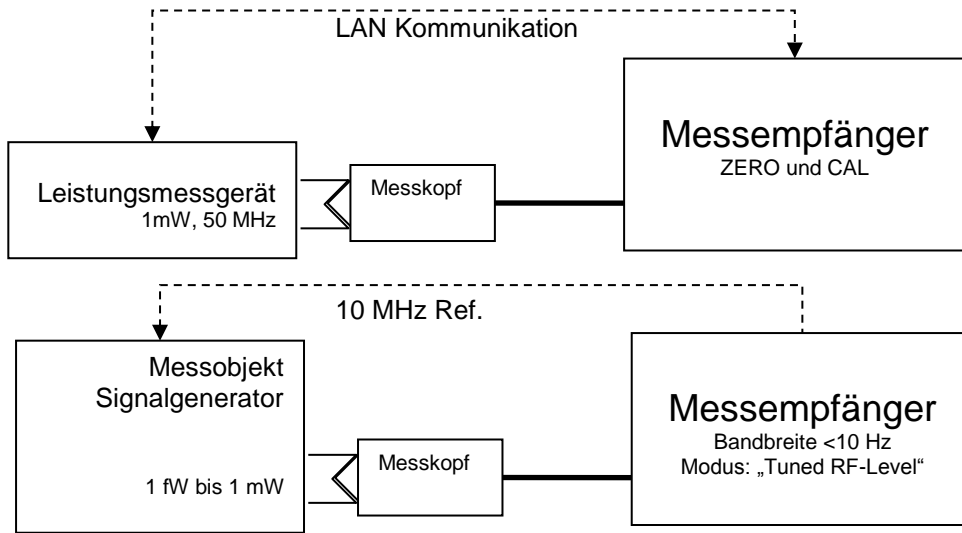


Bild XIII.1.1 Abgleich und Messung über Messempfängersystem

Dabei werden Absolutabweichung des Leistungsmessgerätes und Dynamik des Spektrumanalysators gemeinsam genutzt. Das System gleicht sich während des Umschaltens in einen empfindlicheren Dynamikbereich jeweils gegen den unempfindlicheren „selbst“ ab. Wurden die Korrekturfaktoren der Anzeigebereiche „Leistungsmessung“, „Spektrumanalysator“ und „Vorverstärker“ einmalig vor oder während der Messung bestimmt, so sind selbst kleine Leistungen von bis zu -130 dBm mit guter Wiederholbarkeit messbar. Diese Bestimmung erfolgt bei den Geräten der Serie Agilent N5531S automatisch bei den eingestellten Empfindlichkeitsgrenzen -60 dBm und -80 dBm: Mit einem an das System angeschlossenen HF-Generator wird der Leistungspegel bei fester Frequenz am Eingang des Systems über den internen Abschwächer² des Generators schrittweise in 10 dB-Schritten reduziert. Erreicht die Leistung erstmalig die erste eingestellte Umschaltgrenze werden unmittelbar hintereinander zwei Messungen ausgeführt. Die erste Messung ermittelt den Referenzwert P_{Range1} (mit eingeschaltetem internem Abschwächer am Spektrumanalysator). Die zweite Messung liest den Wert P_{Range2} ohne diesen Abschwächer aus. Daraus ergibt sich der systematische Korrekturwert in dB für den zweiten Bereich C_{Range2} zu

$$C_{Range2} = P_{Range1} - P_{Range2}$$

Um diesen Wert werden alle Folgemessungen im zweiten Bereich automatisch korrigiert.

Bei weiterer schrittweiser Abschwächung über den nächsten Schwellwert wird die Prozedur wiederholt: Die erste Messung ermittelt nun den Referenzwert $P_{Range2'}$ (ohne internem Abschwächer und ohne Vorverstärkung am Spektrumanalysator) an der Umschaltchwelle der Bereiche, die zweite Messung liest den Wert P_{Range3} bei eingeschaltetem Vorverstärker aus. Somit ergibt sich die Korrektur für den Folgebereich zu

$$C_{Range3} = P_{Range2'} - P_{Range3}$$

Bereich 2 und Bereich 3 sind somit auf den ersten und dieser auf die 1 mW-Leistungsreferenz oder die Anzeige des Power Meters abgeglichen.

² Die Abschwächung kann auch über einen externen "auszumessenden" Stufenabschwächer oder kaskadierte Dämpfungsglieder erfolgen

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	3

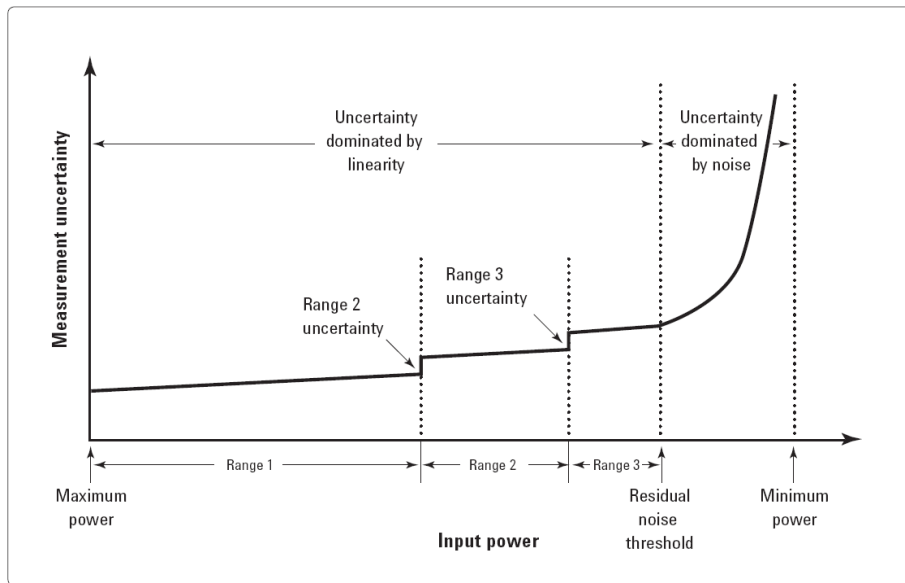


Figure 1. Measurement uncertainty vs. input power relationship

Bild XIII.1.2 Bereichsumschaltung und Einflussfaktoren des Messempfängersystems der Serie Agilent N5531S aus dem Datenblatt des Herstellers

Da bei dieser Messung nur mit kleinen Bandbreiten die gewünschten Ergebnisse erzielt werden, müssen Signale mit geringem Phasenrauschen verfügbar sein, bzw. das Phasenrauschen des Empfängers und dessen Vorverstärkers selbst muss gering sein. Ansonsten ist keine stabile Messung möglich. Der Ablauf gliedert sich dabei bei Empfängern der Serie Agilent N5531S in folgende wesentliche Punkte, Details sind den Bedienunterlagen der verwendeten Geräte zu entnehmen:

- Nullpunktgleich und Abgleich gegen 1 mW, 50 MHz-Quelle (ZERO und CAL am Leistungsmessgerät)
- Umschalten in den Modus „Tuned RF-Level“ und automatische Ermittlung der Korrektur zwischen Leistungsmessgerät und Spektrumanalysator
- Verifikation gegen bekannte 1 mW-Quelle im Modus „Tuned RF-Level“: Messempfängermodus muss den Korrekturfaktor korrekt ermittelt haben
- Anschluss des Kalibriergegenstandes (Linearität abwärts)
- Automatische Ermittlung der Korrekturen an den Bereichsgrenzen, typischerweise -60 dBm (Abschwächerumschaltung) und -80 dBm (Vorverstärkerumschaltung)
- Verifikation mit zweiter Messreihe und Bestimmung der Wiederholbarkeit (Linearität aufwärts)

Unabhängig von den dazu bereits „vorkonfektionierten“ Messköpfen lässt sich die Tuned RF-Level“-Funktion in einer Variante einsetzen: Dies kann nötig sein, um beispielsweise den Frequenzbereich zu erweitern, da Messungen unterhalb von 10 MHz nicht mit den Messköpfen N5532-518 bzw. N5532-526 unterstützt werden. Der Absolutwert der Leistung muss dann durch einen Messkopf gemessen werden, der das entsprechende Frequenzband unter 10 MHz abdeckt (z.B. R&S NRV-Z51). Relativ zu diesen Werten kann dann mit der „Tuned RF-Level“-Funktion bis 100 kHz direkt am Empfänger gemessen werden, wenn der Bezug zu direkter Leistung bei 0 dBm hergestellt wird.

Ausgabe: DMS.36	erstellt von: PF am: s.DMS	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	Seite 4
---------------------------	---	--	---	-------------------

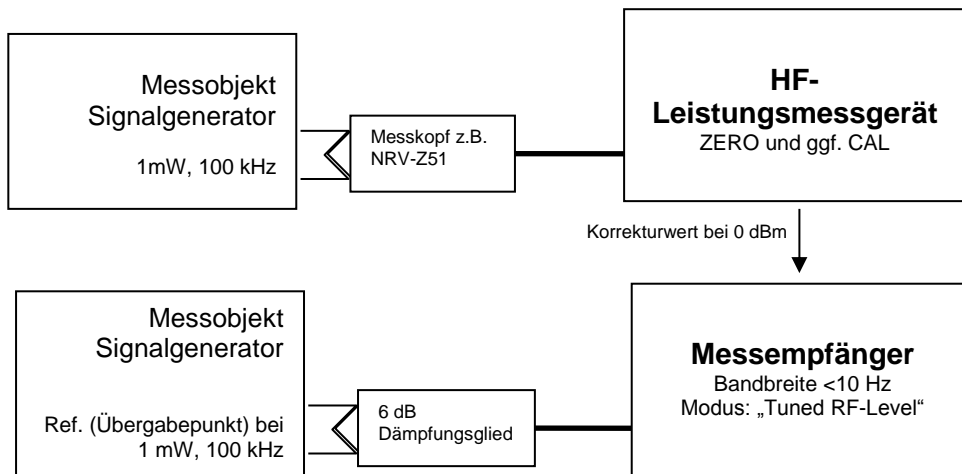


Bild XIII.1.3 Variante der „Tuned-RF-Level“-Funktion

XIII.1.2 Rückführung, Validierung und Historie

Die Leistungsmessköpfe werden direkt (intern) oder über akkreditierte Labore auf Normale der PTB rückgeführt (s. Kapitel II). Zur Validierung von Ergebnissen erfolgt die gegenseitige Verifikation von Bezugs- und Gebrauchsnormalmessköpfen im regelmäßigen Intervall. Die durch Driften³ hervorgerufene Messunsicherheit wird auf Basis der Historien 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 (XII.1.3.3) berücksichtigt.

Komplexe Messempfängersysteme (Gebrauchsnormale) werden intern kalibriert und sind an die Bezugsnormale der Messgrößen „HF-Leistung“, „HF-Dämpfung“ bzw. „Frequenz“ angeschlossen (siehe XIII.2.6 und XIII.2.7). Für kleine Leistungen bis 1 fW und darunter ergibt sich der Absolutbezug über die Linearitätskalibrierung (Messgröße „HF-Dämpfung“), den Abgleich gegen eine bekannte 1 mW, 50 MHz Quelle und die Rückführung des Frequenzganges. Somit können solche Geräte über den gesamten Dynamik- und Frequenzbereich rückgeführt betrieben werden. Da solche Systeme oft aus den Einheiten Sensorkopf (wie Agilent N5532-518), Leistungsmessgerät (wie Agilent N1912A) und Spektrumanalysator (wie Agilent E4440A) bestehen wird zusätzlich die Rückführung der Einzelgeräte wie folgt garantiert und hergestellt (Beispiel für N-Konnektor, 50 Ω):

Messgröße	Sensorkopf	Leistungsmesser	Spektrumanalysator siehe Abschnitt XIII.1.8.1	Verbundeinheit
HF-Leistung	Frequenzgang und Linearität in Vergleichsmessung z.B. gegen R&S NRVC (QMH II, Pos. 22a)	1 mW, 50 MHz, z. B. substituiert gegen gegen 1 mW Referenzquelle (QMH II, Pos 23)	Frequenzgang Vergleichsmessung z. B. gegen R&S NRV-Z55 (QMH II, Pos. 22)	Frequenzgang (Messempfängermodus) in Vergleichsmessung z. B. gegen R&S NRVC (QMH II, Pos 22a)
HF-Reflexionsfaktor	VNA-Messung (wie QMH II, Pos 27b) verifiziert und angeschlossen an QMH II, Pos 25a und 25b		VNA Messung verifiziert und angeschlossen an QMH II, Pos. 25d und 25e	
HF-Dämpfung			Linearitäten und Geräteeigenschaften (Spektrumanalysatormodus) ggf. über Gebrauchsnormale angeschlossen an (kaskadierten) Dämpfungsgliedersatz wie QMH II, Pos. 25c und 25e	
Frequenz		In Zählmessung angeschlossen an (05)	permanent an QMH II, Pos. 05	
Gleichspannung		über Verfahren XIII.2.1.1 z.B. angeschlossen an QMH II, Pos. 02 bzw. 01		

Tabelle XIII.1.2.1 Übersicht zur Rückführung des Messempfängersystems und dessen Einzelkomponenten (vgl. Abschnitt XIII.1.8.1)

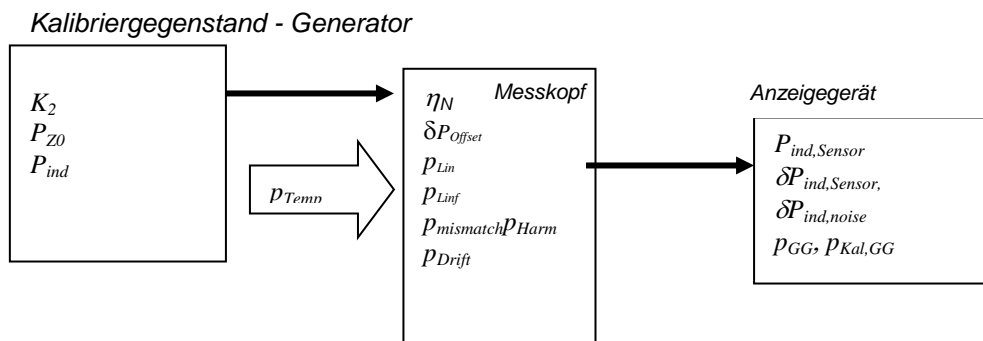
³ =Änderung im Kalibrierintervall, hauptsächlich durch Abnutzung des Steckers und nicht durch Alterung der Wandlerelemente

Die Korrekturwerte und Historie der Normale, insbesondere der 1 mW-50 MHz-Kalibratorausgänge sind innerhalb der Kalibrierintervalle bekannt. Änderungen liegen üblicherweise im Rahmen der Messunsicherheit festgestellt.

Die Substitutionsmessung von Quellen im Vergleich zu solchen Leistungsreferenzen ist in Kapitel XIII.2.1.2 beschrieben.

XIII.1.3 Messunsicherheitsbilanz

XIII.1.3.1 Skizze des Messverfahrens: Vorgegebene bzw. abgelesene Größen:



XIII.1.3.2 Modellgleichung

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

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

(1)

und daraus $K_2 = \frac{P_{ind}}{P_{Z0}}$ (2)

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

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 (typischerweise zwischen 0,011 dB bis 0,058 dB) oder ergibt sich aus der Unsicherheit des relativen Kalibrierfaktors $\eta_{N,rel}$ und der erw. Unsicherheit der Kalibrierquelle $U(P_{1mW})$ zu

$$U(\eta_N) = \sqrt{U^2(\eta_{N,rel}) + U^2(P_{1mW})}$$

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

Gesuchte Größe:

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

K_2 Kalibrierungsfaktor K_2 des Generators

Einflussgrößen:

δP_{Offset} Nullpunktabweichung des Leistungsmesskopfes bzw. leistungsunabhängige

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	6

Messwertverfälschung durch einen möglichen Offset. Die tatsächliche Abweichung nach ZERO-Korrektur am Grundgerät wird zu Null abgeschätzt und innerhalb der Spezifikationsgrenzen als Normalverteilt angenommen (z.B. 2σ , für Messköpfe der Rohdes & Schwarz NRV-Serie). Für eine worst-case-Abschätzung genügt die Berechnung als relatives Unsicherheitsintervall am jeweiligen Messbereichsanfang.

p_{Drift} Die maximale Drift des Kalibrierungsfaktor seit der letzten Kalibrierung (siehe XIII.1.2) abhängig vom Konnektorverschleiß liegt i.d.R. maximal bei $3 \cdot 10^{-4} \cdot f / \text{GHz}$. Individuell wird sie durch den Vergleich vergangener Kalibrierergebnisse und Berücksichtigung der maximalen oder typischen Änderung der Messergebnisse zueinander bestimmt.

p_{Lin} Korrektionsfaktor durch Linearitätsfehler bzw. Interpolationsunsicherheit für Messwerte außerhalb kalibrierter Stützwerte der Messköpfe. Da die Kalibrierung auf diskrete Werte beschränkt ist, Leistungsmessungen jedoch im ganzen Betriebsbereich durchgeführt werden, muss ein Anteil der Messunsicherheit dem Linearitätsfehler der Geräte entnommen werden. Verwendet werden die Angaben des Datenblattes oder die Ergebnisse von Linearitätsmessungen an kalibrierten Dämpfungsgliedern (bzw. deren Kaskadierung). Die Werte dienen als Grenzen eines rechteck- oder normalverteilten Unsicherheitsintervalls.

$p_{Lin f}$ Frequenz- und leistungsabhängige Korrektion v.a. für Dioden-Messköpfe z.B. NRV-Z1. Verwendet wird die spezifizierte Abweichung, die z. B. durch die spannungsabhängige Sperrschichtkapazität des Dioden Gleichrichters zu erwarten ist. Die Angaben dienen als Grenzen eines rechteck- oder normalverteilten Unsicherheitsintervalls. Eine frequenz- und leistungsgenaue Aufstellung ist dem jeweiligen Datenblättern oder den mitgeltenden XL-Tabellen der MU-Berechnung entnehmbar.

$p_{mismatch}$ Korrektion, die berücksichtigt werden muss, da P_{Z0} nicht mit einem ideal angepassten Leistungsmesser gemessen wird. Es gilt: $\frac{P_{ind,Sensor}}{P_{Z0}} = \frac{\eta_{cal}}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2}$, dabei

sind Γ_G und Γ_L die komplexen Reflexionsfaktoren von Quelle (Generator G) und Last L und Γ_{cal} der Kalibrierungsfaktor des Leistungsmesskopfes. Berücksichtigt man den maximalen Einfluss der Fehlanpassung, ergibt sich ein Unsicherheitsintervall $\Delta(p_{mismatch})^4$ aus

$$p_{mismatch} \approx 1 \pm \Delta(p_{mismatch}) = 1 \pm 2 \cdot |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|$$

$$\Delta(p_{mismatch,max}) \approx 200 \cdot |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L| \%$$

bzw.

$$\Delta(p_{mismatch,max}) \approx 2 \cdot 10 \cdot \log(1 \pm |\Gamma_G| \cdot |\Gamma_L|) \text{ dB}$$

$|\Gamma_L|$ ist dem Kalibrierschein des verwendeten Leistungsmesskopfes zu entnehmen, die frequenzgenauen Werte sind in die mitgeltenden XL-Tabellen übertragen worden.

Der Betrag des Reflexionsfaktors der Quelle ist vom Kalibriergegenstand abhängig und muss bei der Kalibrierung jeweils eigens berücksichtigt werden. Da dieser nicht gemessen werden kann, muss die durch die Quellanpassung verursachte Messabweichung anhand des Datenblattes des Herstellers geschätzt werden. Für die Berechnung einer kleinsten angebbaren Unsicherheit wird von einer „typisch angepassten“ Quelle ausgegangen werden, mit abgeschätzten Reflexionsfaktoren

⁴ vgl. z.B. VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 11:2003-A1.1

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	7

von:

$$|\Gamma_G| \approx 0,05 \cdot \sqrt{f/\text{GHz}} \text{ jedoch nicht kleiner als } 0,05$$

Bei Ausgangsleistungen <100 μW ist sogar von deutlich besseren Werten $|\Gamma_G| \leq 0,025 \cdot \sqrt{f/\text{GHz}}$ auszugehen, da in diesen Bereichen die Generatoren mit gut angepassten Dämpfungsgliedern die Leistung regeln.

Die tatsächliche Abweichung des Beitrags wird zu Null und U-verteilt zwischen den errechneten maximalen Grenzen angenommen. Wird der Messkopf auf ein anderes Konnektorsystem adaptiert muss ein Adapterpaar im „Rücken-an-Rücken“-Verfahren mit einer 50 Ω-Breitbandlast abgeschlossen werden, um den maximalen Reflexionsfaktor dieses Paares abzuschätzen. Der Einfluss eines einzelnen Adapters wird unterhalb oder gleich dem des Doppelpaares liegen, so dass die Messunsicherheit nicht unterschätzt werden kann, wenn mit dem Messwert des Doppeladapters $|\Gamma_{L,adaptiert}|$ die Messunsicherheit der Beitrags $p_{mismatch}$ bestimmt wird.

Wird der Leistungsmesskopf gemäß Bild XIII.1.3 „gewechselt“ so ist optional ein zusätzlicher Fehlanpassungsbeitrag zwischen Generator und Eingang des Messempfängers (bestehend bspw. aus 6 dB Dämpfungsglied, Kabel und Messeingang) des Reflexionsfaktors Γ_{L2} zu berücksichtigen, dessen Anpassung für Frequenzen <50 MHz mit $|\Gamma_{L2}| \leq 0,020$ abgeschätzt wird.

$$p_{mismatch} \approx 1 \pm \Delta(p_{mismatch}) = 1 \pm 2\sqrt{|\Gamma_G|^2 \cdot (|\Gamma_L|^2 + |\Gamma_{L2}|^2)}$$

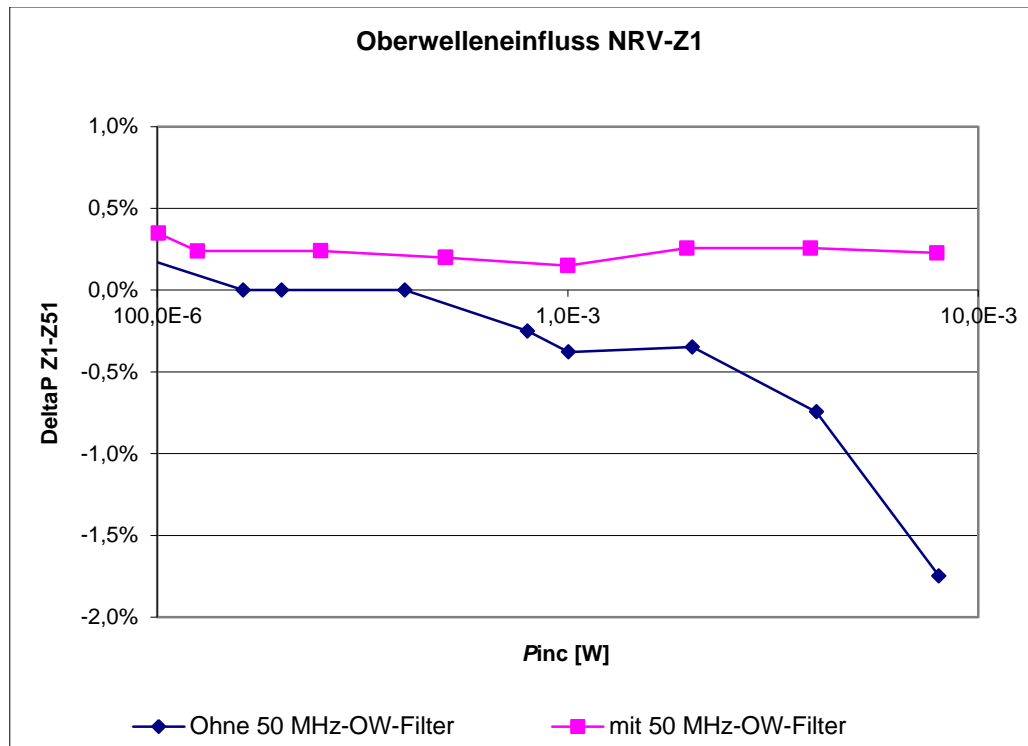
p_{Temp}

Temperatureinfluss/-korrektur. Einfluss der Umgebungstemperatur pro Grad Abweichung von 23 °C auf die Genauigkeit des Messkopfes. Als Normal- oder Rechteckverteilung werden entweder die typischen oder maximalen Werte innerhalb des Verwendungstemperaturfensters verrechnet.

$p_{Harm}, [p_{Harm2}]$

Der Effekt von Oberwellen auf das Messergebnis bei Messung mit Diodenmessköpfen hängt von den Generatoreigenschaften und dessen Oberwellenabstand ab. Eine Abschätzung kann durch Vergleich der Messwerte eines thermischen und eines Diodenmesskopfes mit und ohne Einsatz eines Oberwellenfilters z.B. bei 50 MHz erfolgen. Der Einfluss nimmt zu kleineren Leistungen ab, so dass durch eine Vergleichsmessung bei 100 μW der maximale Abweichungsbeitrag gemessen werden kann. Messungen an den eigenen Generatoren (z.B. R&S SMT03, Oberwellenabstand ca. 46 dBc) ergaben diesbezüglich einen Unterschied von maximal 0,2% im Bereich bis 500 μW.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	8



Für die Berechnung der Messunsicherheit wird daher ein maximaler Einfluss der Oberwellen von

$$(2,5 \cdot P_{inc} / W) \% \quad \text{für } P_{inc} \leq 20 \text{ mW}$$

als Grenze eines rechteckverteilten Unsicherheitsintervalls angenommen.

$\delta P_{ind, Sensor}$ Rundungsabweichungen aufgrund der Auflösung (Zifferschritts) des Anzeigergeräts. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige (± 1 Digit). Es wird angenommen, dass die Rundungsabweichungen durch die Auflösung des Messgerätes innerhalb $\pm 0,5$ Digit gleichverteilt sind.

$\delta P_{ind, noise}$ Anzeigerauschen, d.h. eine dem Messwert überlagerte statistische Komponente, deren absolute Höhe unabhängig von der Messleistung ist. Die spezifizierten Werte werden als Grenzen eines normal- oder rechteckverteilten Unsicherheitsintervalls angenommen.

p_{GG} Korrektur durch die Abweichung des Grundgerätes. Es wird angenommen, dass p_{GG} innerhalb der vom Hersteller angegebenen Grenzen liegt. Somit ergibt sich eine Rechteckverteilung mit dem Schätzwert Null und den Grenzen aus der Herstellerspezifikation für die festgelegte Rekalibrierfrist (12 Monate).

$p_{Kal, GG}$ Korrektionsfaktor durch die Kalibrierung des Grundgerätes z. B. in DC-Anzeigesimulation und Nachweis der Herstellerspezifikation. Die Standardunsicherheit ist dem Kalibrierschein (besser als 0,008%) des Grundgerätes zu entnehmen.

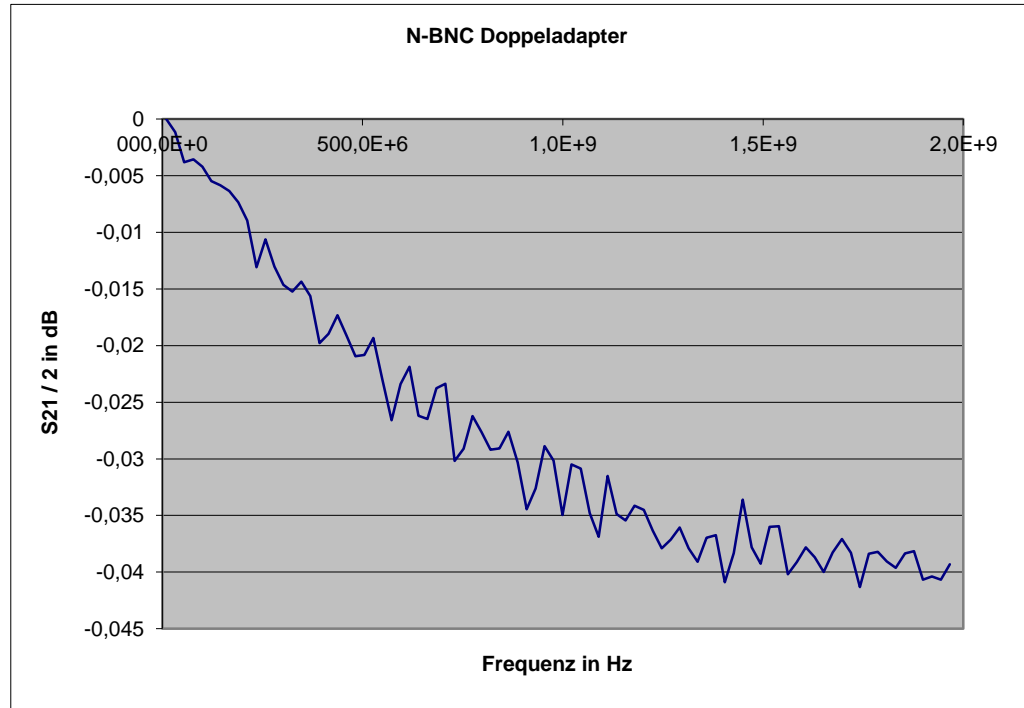
Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	9

p_{Conn}

Werden andere Konnektoren als die der Sensoren verwendet (z.B. BNC, typischerweise an Funktionsgeneratoren) so erhöht sich die Unsicherheit um den Beitrag des Konnektors. Dazu werden übliche Adaptionen als Doppelkonnektor (Back-to-Back-Verfahren⁵) am Netzwerkanalysator ausgemessen, deren Einfluss halbiert und als Maximalabweichung dem Messunsicherheitsbilanz U-verteilt hinzuaddiert (z.B. 0,03 dB / GHz). Der Einfluss lässt sich in der Regel als Proportionalität

$$p_{conn} \sim \sqrt{f / GHz}$$

darstellen.



die für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit des **Kalibrierungsfaktors K2** von HF-Generatoren maßgebliche **Modellgleichung**:

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

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

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

⁵ Gute Abschätzungen sind zum Beispiel mittels zweier Messungen der $|S_{11}|$ in dB hintereinander von „Adapterpaar+Leerlauf“ $|S_{11,OPEN}|$ und „Adapterpaar+Kurzschluss“ $|S_{11,SHORT}|$ möglich. Der Dämpfungsbetrag $L_{Adapter}$ eines einzelnen Adapters ergibt sich dann als Mittelwert der halben Rückflussdämpfung

$$L_{Adapter} \approx \frac{|S_{11,OPEN}| + |S_{11,SHORT}|}{4} \text{ in dB}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	10

XIII.1.3.3 Tabellarische Darstellung der MU-Bilanz für den Kalibrierungsfaktor

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit t	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Rel. Unsicherheitsbeitrag
$P_{ind,Sensor}$	$\overline{P_{ind,Sensor}}$	$u(P_{ind,Sensor})$	Normal	1	$w(P_{ind,Sensor})$
η_N	1	$W(\eta_N)$	Normal	1	$w(\eta_N)$
$\delta P_{ind,Sensor}$	0	$\Delta(\delta P_{ind,Sensor})/\sqrt{3}$	Rechteck	$1/P_{ind,Sensor}$	$w(\delta P_{ind,Sensor})$
$\delta P_{ind,noise}$	0	$U(\delta P_{ind,noise})/2$	Normal	$1/P_{ind,Sensor}$	$w(\delta P_{ind,noise})$
p_{GG}	1	$\Delta(p_{GG})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$w(p_{GG})$
$p_{Kal,GG}$	1	$A(p_{Kal,GG})/2$	Normal	1	$u(p_{Kal,GG})$
δP_{Offset}	0	$u(\delta P_{Offset})$	Normal	$1/P_{ind,Sensor}$	$w(\delta P_{Offset})$
p_{Drift}	1	$\Delta(p_{Drift})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$w(p_{Drift})$
p_{Lin}	1	$W(p_{Lin})/2$	Normal	1	$w(p_{Lin})$
p_{Linf}	1	$W(p_{Linf})/2$	Normal	1	$w(p_{Linf})$
$p_{mismatch}$	1	$\Delta(p_{mismatch})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{mismatch})$
p_{Harm}	1	$\Delta(p_{Harm})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{Harm})$
p_{Temp}	1	$u(p_{Temp})$	Normal	1	$w(p_{Temp})$
p_{conn}	1	$\Delta(p_{conn})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{conn})$
K_2	$\frac{P_{ind}}{P_{Z0}}$	-			$w(K_2)$

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:

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

Da es in der HF-Messtechnik üblich ist Leistungsangaben in dBm anzugeben lässt sich die Kalibrierung genauso als Abweichung in dB aus eingestellter Leistung am Generator (Kalibrierwert in dBm) zur eingestrahlenen Leistung an $Z_0=50 \Omega$ (in dBm) durchführen. Die Unsicherheit in dB errechnet sich dann zu

$$U_{dB}(P_{Z0}) = 10 \cdot \log(1 - W(K_2)) \text{ dB}^6$$

(vgl. auch XIII.1.5)

⁶ Die Intervallgrenzen sind definitionsgemäß nicht gleich. Die „positive“ Messunsicherheit ergibt sich zu

$$U_{dB+}(P_{Z0}) = 10 \cdot \log(1 + W(K_2)) \text{ dB}$$

die negative Messunsicherheit wird jedoch immer größer sein, so dass diese zur Angabe einer symmetrischen Unsicherheit praktikabel ist.

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 ergibt sich als tabellarische Darstellung der MU-Bilanz für den relativen Kalibrierungsfaktor

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	rel. Unsicherheitsbeitrag
$P_{ind,NRVD}(f_{ref})$	$P_{z0}(f_{ref})$				
$P_{ind,NRVD}(f)$	$P_{z0}(f)$				
$\eta_N(f_{ref})$	1	$W(\eta_{N,ref})/2$	Normal	1	$w(\eta_{N,ref})$
$\eta_N(f)$	1	$W(\eta_N)/2$	Normal	1	$w(\eta_N)$
$\delta P_{ind,NRVD}(f_{ref})$	0	$\Delta(\delta P_{ind,NRVD,ref})/\sqrt{3}$	Rechteck	$1/P_{ind,NRVD}$	$w(\delta P_{ind,NRVD,ref})$
$\delta P_{ind,NRVD}(f)$	0	$\Delta(\delta P_{ind,NRVD})/\sqrt{3}$	Rechteck	$1/P_{ind,NRVD}$	$w(\delta P_{ind,NRVD})$
$\delta P_{ind,noise}(f_{ref})$	0	$U(\delta P_{ind,noise,ref})/2$	Normal	$1/P_{ind,NRVD}$	$w(\delta P_{ind,noise,ref})$
$\delta P_{ind,noise}(f)$	0	$U(\delta P_{ind,noise})/2$	Normal	$1/P_{ind,NRVD}$	$w(\delta P_{ind,noise})$
$p_{Lin}(f_{ref})$	1	$W(p_{Lin,ref})/2$	Normal	1	$w(p_{Lin,ref})$
$p_{Lin}(f)$	1	$W(p_{Lin})/2$	Normal	1	$w(p_{Lin})$
$p_{mismatch}(f_{ref})$	1	$\Delta(p_{mismatch,ref})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{mismatch,ref})$
$p_{mismatch}(f)$	1	$\Delta(p_{mismatch})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{mismatch})$
$p_{Harm}(f_{ref})$	1	$\Delta(p_{Harm,ref})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{Harm,ref})$
$p_{Harm}(f)$	1	$\Delta(p_{Harm})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{Harm})$
p_{conn}	1	$(\Delta(p_{conn}) - \Delta(p_{conn,ref}))/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{conn})$
$K_{2,rel}$	$\frac{P_{z0}(f_{ref})}{P_{Z0}(f)}$	-			$w(K_2)$

Üblicherweise wird die Unsicherheit des relativen Frequenzganges aufgrund der Korrelationen die Unsicherheit der absoluten Werte nicht überschreiten.

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

Die Erweiterung auf HF-Absolutleistungskalibrierung (Kalibrieren von Quellen) kann ohne weitere Einschränkung erfolgen, denn es gilt $W(P_{Z_0}) = W(K_2)$.

XIII.1.6 Kalibrieren von HF-Spannungsquellen

Die Kalibrierung ,z. B. 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_{Z_0} 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 $P_{ind,Sensor}$ in eine Spannungsanzeige U_{ind} :

$U_{ind} = \sqrt{P_{ind,Sensor} \cdot Z_0}$ erfolgt bei vielen Leistungsmessgeräten bereits automatisch, wenn man die Anzeigeeinheit auf „Volt“ umschaltet. Die Spannung U_{ind} ist aber nur exakt die Spannung am Eingang des Leistungsmessers, wenn die Eingangsimpedanz Z_{Sensor} des Messkopfes auch exakt 50Ω 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:

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

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 $W(P_{Z_0})$ (siehe XIII.1.5) der Leistung P_{Z_0} :

$$\frac{U(U_{Z_0})}{U_{Z_0}} = W(U_{Z_0}) = \frac{1}{2} \cdot W(P_{Z_0}) \text{ wegen } \left| \frac{\partial U_{Z_0}}{\partial P_{Z_0}} \right| = \sqrt{Z_0} \cdot \frac{1}{2\sqrt{P_{Z_0}}}$$

Die relative Messunsicherheit der Spannung U_{Z_0} entspricht also nur der Hälfte der relativen Messunsicherheit 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 $\Delta Z_X \ll Z_0$).

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

Üblicherweise wird bei Spannungsgeneratoren der Frequenzgang $F_{U_{Z_0}}(f)$ gemessen mit: Analog zu XIII.1.4 gilt unter ausschließlicher Berücksichtigung aller frequenzabhängigen Unsicherheitsbeiträge in $W(U_{Z_0})$:

$$w^2(F_{U_{Z_0}}) = w^2(U_{Z_0}(f)) + w^2(U_{Z_0}(f_{ref})) \text{ bzw.}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	13

$$w(F_{UZO}) = \frac{1}{2} w(K_{2,rel})$$

XIII.1.8 Sekundäre Geräteparameter von HF-Quellen

XIII.1.8.1 Signalpegeldifferenzen - Oberwellen, Subharmonische oder Nebenwellen

Die Kalibrierung von Oberwellen, Subharmonischen oder Nebenwellen (Signalpegeldifferenzen angegeben in dBc) erfolgt nach den Verfahren der Richtlinie in [VDI/ VDE/ DKD/ DGQ 2622-Blatt 14.1:2015](#)-Abs. 5.2.4 und 5.2.5 angegeben. Als Normal dient ein Spektrumanalysator wie z.B. der Agilent PSA E4440 des Mesempfängersystems N5531S oder einer der Spektrumanalysatoren R&S FSU26 oder FSEK. Diese Geräte werten bereits auf Knopfdruck das empfangene Spektrum auf diese Parameter aus, so dass die Messung vereinfacht wird. Der Empfänger Agilent E4440A hat dazu eine "Ein-Knopf-Auswertung", die automatisch Grundwelle und Frequenz und Pegel der Oberwellen ermittelt. Nähere Details dazu sind z.B. dem Handbuch entnehmbar:

Harmonic Distortion Calculations

The analyzer provides a one-button automated measurement for harmonic measurements (from the second to the tenth harmonic) and provides a calculation of the total harmonic distortion for continuous wave signals or complex digitally modulated carriers.

When the harmonic distortion measurement is activated, the analyzer searches for the fundamental and determines the frequencies of the harmonics. The analyzer then changes to zero span, and measures the amplitude of each harmonic. The analyzer calculates the total harmonic distortion by dividing the root-sum-squares of the harmonic voltages by the fundamental signal voltage and then provides the result as a percentage.

$$\%THD = 100 \times \frac{\left(\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{max}} E_h^2} \right)}{E_f}$$

Where:

- %THD = Total Harmonic Distortion as a percentage
- h = harmonic number
- H_{max} = Maximum Harmonic Value listed
- E_h = voltage of harmonic h
- E_f = voltage of fundamental signal

Die Rückführung des als Normal verwendeten Spektrumanalysators ist dabei der DKD Richtlinie 2622-Blatt 11:2003-Tabelle 1 entnehmbar. Entscheidend ist die Rückführung der Linearität der Anzeige auf die Messgröße HF-Dämpfung so wie diese bspw. im [Leitfaden \(Entwurf\) DKD-L 02/1-1](#) beschrieben wird. Die Kenntnisse des Dynamikbereichs werden, neben der Linearitätskalibrierung, über den Nullpunkt gewonnen ("0-Watt-Normal" = Eingang mit 50 Ω abgeschlossen, siehe dazu auch Abschnitt XIII.5.9), so dass der in der Messunsicherheitsbilanz genannte Signal-zu-Rauschabstand garantiert werden kann. Der kleinste darstellbare Nullwert ergibt sich bezogen auf 1 Hz Bandbreite *B* mit der Boltzmannkonstante *k*, und der maximalen Temperatur im Messraum *T* = 298,15 K zu

$$P = kTB = 4,1 \cdot 10^{-21} \text{ W}$$

$$P[\text{Hz}] = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right) = -173,9 \text{ dBm}[\text{Hz}]$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	14

und ist nur noch dem "Anzeigerauschen"⁷ des Analysators überlagert. Liegt dieses im Mittel beispielsweise unterhalb -150 dBm[Hz], kann auch mit Bandbreiten bis 10 kHz bei sehr kleinen Eingangspegeln der Oberwellenmessung noch der nötige Signal-zu-Rausch-Abstand erzielt werden, da die empfangene Leistung P_M proportional zur Bandbreite ist. Mit dem Bandbreitenfaktor b in dB ergibt sich die Gesamtleistung:

$$b = 10 \cdot \lg\left(\frac{B}{1 \text{ Hz}}\right) \text{ dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{10 \text{ kHz}}{1 \text{ Hz}}\right) \text{ dB} = 40 \text{ dB}$$

$$P_M = -150 \text{ dBm} + b = -110 \text{ dBm}$$

XIII.1.8.1.1 Modellgleichung

Die Modellgleichung für die Messung von Signalen bezogen auf das Trägersignal in dBc kann dargestellt werden als

$$\Delta L = P_{carrier} - P_f + \delta P_{SNR} + \delta P_{Lin} + \delta P_{Flatness} + \delta P_{Flatness,cable} + \delta P_{MM,carrier} + \delta P_{MM,f} + \delta P_{random}$$

mit

- ΔL Gesuchter Oberwellen/ Signalabstand bezogen auf den Träger (Grundfrequenz)
- P_f Signalleistung der Kalibrierfrequenz (Testfrequenz/ Marker) in dBm
- $P_{carrier}$ Signalleistung des Trägers in dBm
- δP_{SNR} Einfluss des Signalabstandes zum Rauschen (Noise) des Spektrumanalysators
- δP_{Lin} Nichtlinearität des Normals
- $\delta P_{Flatness}$ Frequenzgangabweichung des Normals
- $\delta P_{Flatness,cable}$ Frequenzgangabweichung des Kabels
- $\delta P_{MM,carrier}$ Fehlanpassung zwischen Messobjekt und Normal bei der Grundfrequenz
- $\delta P_{MM,f}$ Fehlanpassung zwischen Messobjekt und Normal bei der Testfrequenz
- δP_{random} Zufällige Einflüsse wie Wiederholbarkeit, Strahlenschärfe oder Anzeigerauschen

δP_{SNR} Der Signal-zu-Rauschabstand ist vom Messwert, der gewählten Bandbreite und der damit verbunden minimal empfangenen Rauschleistung abhängig. Für die hier angegebene Berechnung muss der Spektrumanalysator so eingestellt werden, dass mindestens ein SNR von 12 dB garantiert werden kann, z.B. -92 dBm Rauschleistung („Noise Floor“) bei -80 dBc Oberwellenabstand. Mit rauscharmen Empfängern, ist dies auch bei Verwendung höherer Bandbreiten möglich, wenn die erreichbare minimale Rauschleistung bezogen auf 1 Hz klein genug ist. Der maximale Einfluss a_{SNR} des SNR lässt sich dann berechnen als

$$a_{SNR} = 10 \cdot \log\left(1 + 10^{\frac{-SNR}{10}}\right) = 10 \cdot \log\left(1 + 10^{\frac{-12}{10}}\right) = 0,27 \text{ dB}$$

δP_{Lin} Die Nichtlinearität des verwendeten Empfängers kann dem Kalibrierschein oder dem Datenblatt entnommen werden. Dieser Wert wird als Intervallgrenze einer Rechteckverteilung verwendet.

$\delta P_{Flatness}$
 $\delta P_{Flatness,cable}$ Der Frequenzgang des Empfängers und die damit verbundene relative Abweichung bei Grundwelle und z.B. der Oberwelle hat Einfluss auf die richtige Bewertung des Signals der Testfrequenz. Der Einfluss muss im jeweils betrachteten Bewertungsband als maximaler relativer Unterschied der Anzeigeabweichung zwischen Bezugsfrequenz (z. B. Grundfrequenz) und

⁷ DANL: Displayed Averaged Noise Level

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	15

betrachteter Frequenz (z. B. Oberwelle) berücksichtigt werden. Der Einfluss des verwendeten Kabels ist dabei separat zu betrachten, sofern dessen Dämpfung nicht korrigiert wird.

$\delta P_{MM,carrier}$
 $\delta P_{MM,f}$

Die Intervallgrenzen a_{MM} des Einflusses der Fehlanpassung bei der Grundfrequenz bzw. bei der Testfrequenz können mit den Beträgen der Reflexionsfaktoren von Quelle (Generator) $|\Gamma_G|$ und Last (Empfänger) $|\Gamma_L|$ beschrieben werden zu

$$a_{MM} = 10 \cdot \log\left(\left(1 - |\Gamma_G| |\Gamma_L|\right)^2\right)$$

$|\Gamma_G|$ wie in Abs. XIII.1.3.2 genannt

$|\Gamma_L|$ aus dem Kalibrierschein des verwendeten Empfängers

Es ergeben sich Intervallgrenzen einer zu erwartenden u-Verteilung.

δP_{random}

Zufällige Einflüsse durch die Auflösung des Markers, das Anzeigerauschen und die Wiederholbarkeit der Messung.

XIII.1.8.1.2 Tabellarische Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz

Kalibriert wird eine Signalpegeldifferenz von -80 dBc im Frequenzbereich 3 Hz bis 26,5 GHz durch Verwendung der „Delta-Marker“ Funktion bezogen auf den Spitzenwert des Signals (Peak).

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$u_i(y)$
$P_{carrier}$	$p_{carrier}$					
P_f	p_f					
δP_{SNR}	0 dB	a_{SNR}	u-verteilt	$\frac{a_{SNR}}{\sqrt{2}}$	1	u_{SNR}
δP_{Lin}	0 dB	a_{Lin}	Rechteck	$\frac{a_{Lin}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Lin}
$\delta P_{Flatness}$	0 dB	$a_{Flatness}$	Rechteck	$\frac{a_{Flatness}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Flatness}$
$\delta P_{Flatness,cable}$	0 dB	$a_{Flatness,cable}$	Rechteck	$\frac{a_{Flatness,cable}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Flatness,cable}$
$\delta P_{MM,carrier}$	0 dB	$a_{MM,carrier}$	u-verteilt	$\frac{a_{MM,carrier}}{\sqrt{2}}$	1	$u_{MM,carrier}$
$\delta P_{MM,f}$	0 dB	$a_{MM,f}$	u-verteilt	$\frac{a_{MM,f}}{\sqrt{2}}$	1	$u_{MM,f}$
δP_{random}	0 dB	a_{random}	Rechteck	$\frac{a_{random}}{\sqrt{3}}$	1	u_{random}
ΔL	erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$u(\Delta L) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$ $U(\Delta L) = k \cdot u(\Delta L)$		

XIII.1.8.2 Einseitenbandphasenrauschen $\phi(t)$

Das vom Messobjekt generierte Signal sollte in einem gewissen Frequenzabstand (Offset) vom Träger entfernt möglichst rauscharm, d.h. arm an weiteren unerwünschten Spektralanteilen, sein. Diese spektrale Darstellung der zeitlichen Abweichungen (Jitter) wird als Phasenrauschen bezeichnet. Die

Messung kann wie in XIII.1.8.1 beschrieben direkt an einem Spektrumanalysator erfolgen. Da mit dieser Methode das Phasenrauschen des Messobjektes nicht von dem des Analysators getrennt werden kann ist grundsätzlich nur eine Aussage zum "kombinierten Phasenrauschen" möglich. Dieses kombinierte Phasenrauschen wird immer größer sein als das der einzelnen Instrumente. Wenn das Phasenrauschen des Generators also unterhalb dem des Analysators liegt kann mit der Messung kein absoluter Wert mehr mit kleiner Unsicherheit angegeben werden, es ist jedoch eine Konformitätsaussage möglich, dass das einzelne Phasenrauschen des Messobjektes $\varphi_{DUT}(f)$ in keinem Fall den kombinierten Wert übersteigt (z.B. $\varphi_{DUT}(f) \leq 110$ dBc statt $\varphi_{DUT}(f) = 110$ dBc).

Das Einseitenbandphasenrauschen in Abhängigkeit des Frequenzabstandes zur Trägerfrequenz wird als Signalpegeldifferenz bezogen auf den Träger in dBc angegeben und auf 1 Hz Bandbreite normiert. Die eingestellte Messbandbreite spielt aufgrund der Normierung zwar nur eine geringe Rolle, diese wird jedoch klein (z.B. 10 Hz) gewählt um den Dynamikbereich des Analysators voll auszunutzen. Viele Analysatoren ermöglichen diese Normierung bereits automatisch (Messung dBc[Hz]), anderenfalls ist der Messwert auf Basis der eingestellten Bandbreite *RBW* zu korrigieren:

$$\varphi(t)_{corr} = \varphi(t)_{measured} - 10 \cdot \log(RBW / 1 \text{ Hz}) \text{ dB}$$

Der Ablauf der Messung ist in der Richtlinie [VDI/VDE/DKD/DGQ 2622-Blatt 14.1:2015](#)-Abs. 5.2.6 beschrieben.

Die Rückführung dieser Messgröße erfolgt auf "Frequenz" (kurzzeitiges Frequenzrauschen = Phasenrauschen) und "Dämpfung" (Nichtlinearität). Der Dynamikbereich ist in diesem Fall durch das eigene Phasenrauschen (das konstruktionsbedingte Einseitenbandphasenrauschen) des Analysators begrenzt. Die Messung dieses Grundrauschens ist dabei nicht absolut möglich, da immer das kombinierte Phasenrauschen eines Generators und des Analysators gemessen werden. Auch würde der genaue Wert keine Korrektion des Ergebnisses zulassen. Der kombinierte Wert liegt jedoch immer über dem Wert der einzelnen Geräte, so dass eine "worst case" Abschätzung gemacht werden kann. Die Verifikation über diese "Kurzschlussmessung" eines rauscharmen Signalgenerators mit einem rauscharmen Analysator gilt als ausreichend um die Rückführung auf die Messgröße Frequenz sicherzustellen. Die Linearität des Empfängers wird auf Dämpfungsglieder rückgeführt.

XIII.1.8.2.1 Modellgleichung

Die Modellgleichung für die Messung des Einseitenbandphasenrauschens bezogen auf das Trägersignal in dBc kann dargestellt werden als

$$\varphi(t) = P_{carrier} - P_f + \delta P_{SNR} + \delta P_{Lin} + \delta P_{MM,carrier} + \delta P_{MM,f} + \delta P_{IF} + \delta P_{\varphi-Analyzer} + \delta P_{random}$$

abweichend bzw. zusätzlich zu 1.8.1.1 mit

$\varphi(t)$ Gesuchtes Phasenrauschen des Messobjektes bezogen auf 1 Hz Bandbreite
 P_f Signalleistung der Kalibrierfrequenz (Offset/ Marker) in dBm
 $P_{\varphi-Analyzer}$ Einfluss durch das „eigene“ Phasenrauschen des Spektrumanalysators

$\delta P_{\varphi-Analyzer}$ Der Einfluss des Phasenrauschens des verwendeten Analysators wird aus den technischen Daten des verwendeten Gerätes abgeschätzt und kann durch Anschluss eines rauscharmen Generators verifiziert werden. Diese Methode lässt zwar keine Trennung in Generator- und Analysatorrauschen zu, jedoch kann aus den Werten eine maximale Obergrenze φ_{max} für beide Geräte definiert werden, mit der ggf. die Angaben des Herstellers für den Analysator oder den Generator bestätigt werden können. Die Intervallgrenzen $a_{\varphi-Analyzer}$ berechnen sich ähnlich wie a_{SNR} zu

$$a_{\varphi-Analyzer} = 10 \cdot \log \left(1 + 10^{\frac{\varphi(t) - \varphi_{max} R}{10}} \right)$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	17

XIII.1.8.2.2 Tabellarische Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz

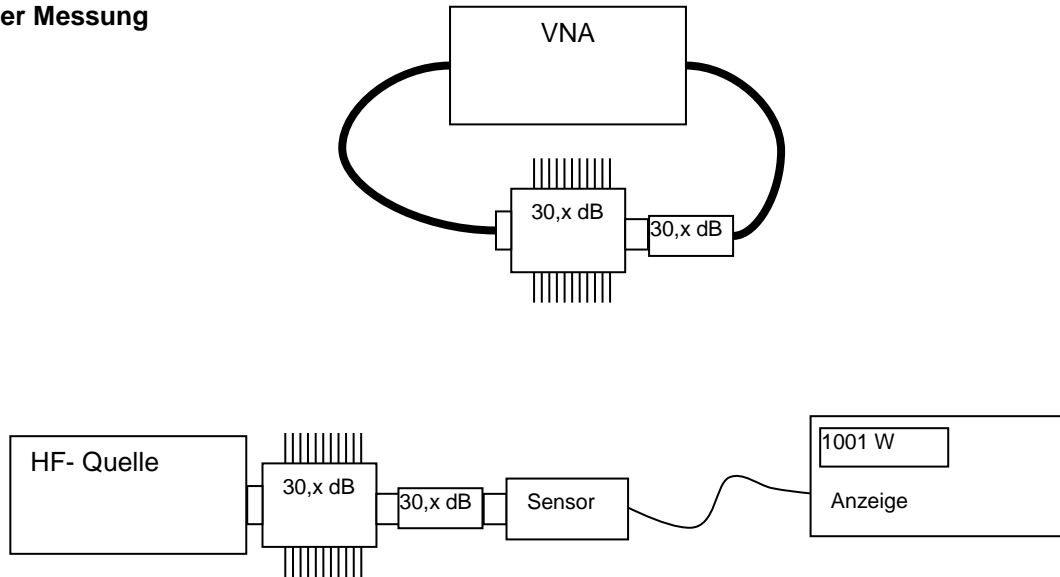
Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$u_i(y)$
$P_{carrier}$	$p_{carrier}$					
P_f	p_f					
δP_{SNR}	0 dB	a_{SNR}	u-verteilt	$\frac{a_{SNR}}{\sqrt{2}}$	1	u_{SNR}
δP_{Lin}	0 dB	a_{Lin}	Rechteck	$\frac{a_{Lin}}{\sqrt{3}}$	1	u_{Lin}
$\delta P_{Flatness}$	0 dB	$a_{Flatness}$	Rechteck	$\frac{a_{Flatness}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Flatness}$
$\delta P_{Flatness,cable}$	0 dB	$a_{Flatness,cable}$	Rechteck	$\frac{a_{Flatness,cable}}{\sqrt{3}}$	1	$u_{Flatness,cable}$
$\delta P_{MM,carrier}$	0 dB	$a_{MM,carrier}$	u-verteilt	$\frac{a_{MM,carrier}}{\sqrt{2}}$	1	$u_{MM,carrier}$
$\delta P_{MM,f}$	0 dB	$a_{MM,f}$	u-verteilt	$\frac{a_{MM,f}}{\sqrt{2}}$	1	$u_{MM,f}$
δP_{IF}	0 dB	a_{IF}	Rechteck	$\frac{a_{IF}}{\sqrt{3}}$	1	u_{IF}
$\delta P_{\varphi-Analyzer}$	0 dB	$a_{\varphi-Analyzer}$	u-verteilt	$\frac{a_{\varphi-Analyzer}}{\sqrt{2}}$	1	$u_{\varphi-Analyzer}$
δP_{random}	0 dB	a_{random}	Rechteck	$\frac{a_{random}}{\sqrt{3}}$	1	u_{random}
ΔL	erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$u(\Delta L) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$ $U(\Delta L) = k \cdot u(\Delta L)$		

Da in diesem Budget das Phasenrauschen des Analysators nicht von dem des zur Verifikation eingesetzten Generators getrennt werden kann, kann gezeigt werden, dass die errechnete Messunsicherheit ebenso anwendbar ist für die Bestimmung des Einseitenbandphasenrauschens für Analysatoren (Messgeräten).

XIII.1.9 Quellen mit Leistungen bis 300 W

Große Leistungen können durch Einsatz von Leistungsdämpfungsgliedern oder deren Kaskadierung gemessen werden. Alternativ ist bis 200 W auch ein Direktmessverfahren an einem kalibrierten Durchgangsleistungsmesser (z.B. URV5-Z4) an einem 50 Ω Lastwiderstand möglich.

S-Parameter-Bestimmung vor der Messung



S-Parameter-Bestimmung nach der Messung

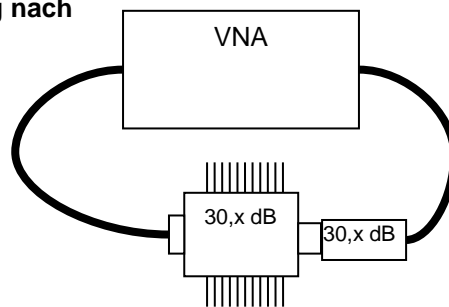


Bild XIII.1.9.1 Kalibrierung hoher Leistungen mit Dämpfungsgliedern. Die S-Parameter der Dämpfungsgliedkombination sind unmittelbar vor und nach der Verwendung im erwärmten Zustand zu messen und zu berücksichtigen.

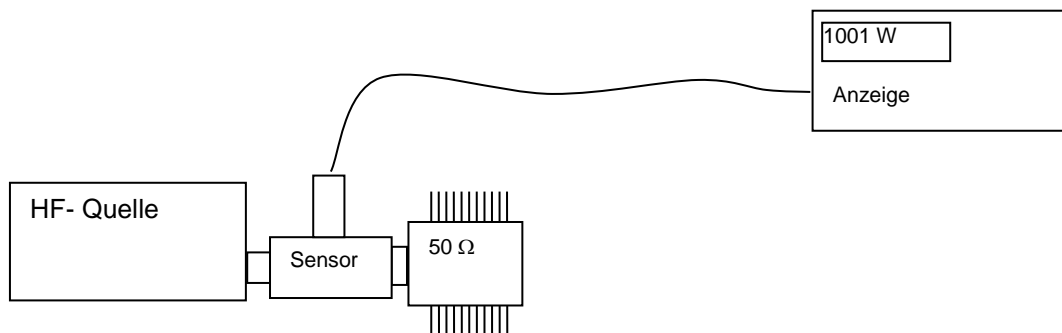


Bild XIII.1.9.2 Kalibrierung hoher Leistungen mit Durchgangsleistungsmesskopf und Last

XIII.1.9.2 Messunsicherheit

Für die Direktmessung mit Durchgangsleistungsmesskopf können die Modelle aus XIII.1.3 verwendet werden. Der Wert der Hochfrequenzleistung, die die HF-Quelle an der Ausgangsebene wie in Bild XIII.1.9.1 in eine 50-Ω-Last abgibt, lässt sich mit den Größen aus XIII.1.3 näherungsweise berechnen aus der Beziehung:

$$P_{Z0} = \frac{1}{|S_{21}|^2} \cdot \frac{P_{ind,Sensor} - \delta P_{ind,Sensor} - \delta P_{Offset} - \delta P_{ind,noise}}{\eta_N} \cdot 2P_{S21} \cdot P_{mismatch,S11} \cdot P_{mismatch,S22} \cdot P_{Drift} \cdot P_{Lin} \cdot P_{Linf} \cdot P_{Temp} \cdot P_{Harm} \cdot P_{GG} \cdot P_{Kal,GG}$$

mit

S_{21}, S_{22}, S_{11} Vierpolparameter des Dämpfungsgliedes. Der Betrag der Dämpfung für die nötigen Dämpfungsglieder wie z.B. der Kaskadierung aus einem Leistungsdämpfungsglied von 30 dB und einem Standarddämpfungsglied kann einzeln gemessen werden (siehe XIII.5) und deren Summe rechnerisch bestimmt werden. Die Reflexionsfaktoren am Eingang und Ausgang können ebenfalls gemessen werden, wobei der Einfluss von Mehrfachreflexionen bei diesen Dämpfungswerten vernachlässigt werden kann.

p_{S21} Korrektur durch die Unsicherheit der Dämpfungsbestimmung (wie in XIII.5 ermittelt). Da bis zu zwei Dämpfungsglieder kaskadiert werden tritt dieser Anteil doppelt auf (ist jedoch stark korreliert).

$p_{mismatch}$ Korrektur aufgrund der Fehlanpassung zwischen Generator und Eingang des Dämpfungsgliedes. Das maximale Werteintervall Δ wird aus den angenommenen bzw. gemessenen Reflexionsfaktorbeträgen von Quelle, Dämpfungsglied und Leistungsmesskopf ermittelt:

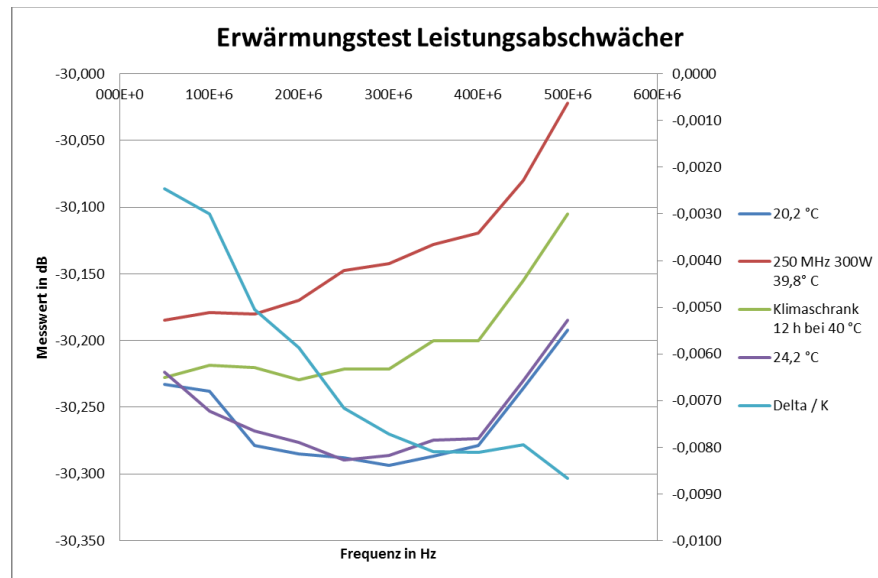
$$\Delta p_{mismatch} = 20 \log \frac{1 + (|\Gamma_G S_{11}| + |\Gamma_L S_{22}| + |\Gamma_G \Gamma_L S_{11} S_{22}| + |\Gamma_G \Gamma_L S_{21} S_{12}|)}{1 - |\Gamma_G| |\Gamma_L|}$$

p_{Temp} Der Temperatureinfluss des Last-Dämpfungsgliedes wurde durch Deltamessung der Dämpfungswerte bei Erwärmung⁸ bestimmt. Die Dämpfungsänderung wurde mit Hilfe zweier thermischer Leistungssensoren gemessen. Der Erste über einen 50 dB-Richtkoppler am Eingang der 50 dB-Dämpfungsgliedkombination. Der zweite Leistungssensor am Ausgang der Dämpfungsgliedkombination. Die Abkühlung in Abhängigkeit der Zeit t in Minuten folgt dabei dem Trend einer Wurzelfunktion., Bis 300 W liegt diese unter 0,13 dB⁹, sofern die Dämpfungsmessung innerhalb eines Intervalls von Weniger als 5 Minuten nach Leistungsabschaltung erfolgen wird. Zusammen mit dem Temperatureinfluss des Leistungsmesskopfes werden sich somit gesamt etwa 3 % als Intervallgrenzen bei Last ergeben.

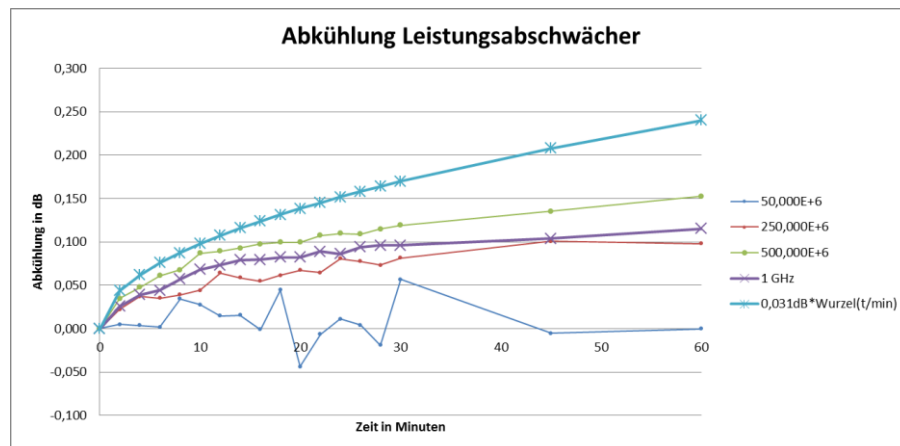
⁸ Messung unter Last bis 300 W bei 500 MHz

⁹ Validiert durch Einsatz eines Leistungsmesskopfes mit Richtkoppler (R & S NRT-Z14)

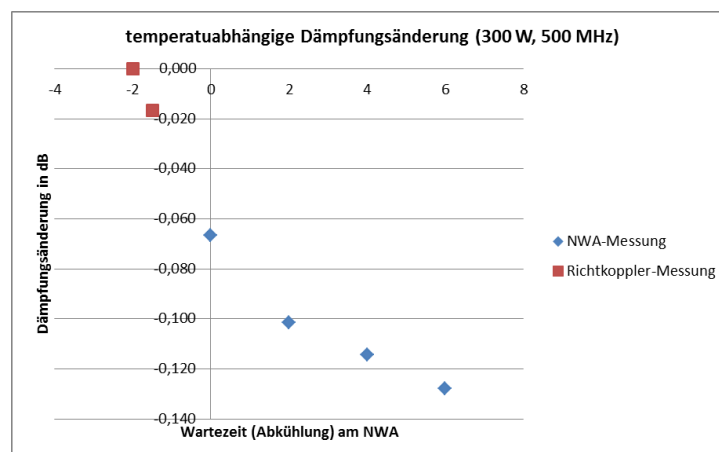
Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	20



Erwärmungstest des Leistungsabschwächers bis 300 W und im Klimaschrank



Abkühlung des Leistungsabschwächers



Dämpfungsänderung bei Abkühlung des Leistungsabschwächers am Richtkoppler bzw. NWA (t=0 bezieht sich auf die erste Messung am NWA)

XIII.1.9.2.1 Messunsicherheitsbilanz

Das Budget aus XIII.1.3 erweitert bzw. verändert sich demzufolge um

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Rel. Unsicherheits-
-------	------------	--------------------------	------------	--------------------------	---------------------

Ausgabe: DMS.36	erstellt von: PF am: s.DMS	geprüft/genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	Seite 21
---------------------------	---	---	---	--------------------

					beitrag w(yi)
p_{S21}	1	$\Delta(p_{S21})/2$	Normal	2	$w(p_{S21})$
$p_{mismatch,S22}$	1	$\Delta(p_{mismatch,S22,max})/\sqrt{2}$	U-verteilt	1	$w(p_{mismatch,S22})$

XIII.1.10.6 Zusammenfassung der Einflussgrößen und Ergebnisse

Die Zahlenwerte und vollständigen Matrizen für die Einflussgrößen und die frequenzgenauen Ergebnisse an den Berechnungstützpunkten für die einzelnen Messgrößen, Bezugs- und Gebrauchsnormale, Adapter oder Dämpfungsgliedkombinationen sind den mitgeltenden Excel-Tabellen

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XIII.1-Kalibrieren-von-HF-Leistungsquellen.xlsx>

zu entnehmen. Zusammengefasste Ergebnisse werden im Leistungsnachweis bzw. der Anlage zur Akkreditierung aufgeführt.

Grundsätzlich können mit einem nach den o.g. Verfahren eingemessenen Generator HF-Leistungsmessgeräte oder Oszilloskope kalibriert werden, sofern Anpassung als auch mögliche Adaptoreinflüsse zusätzlich berücksichtigt werden.



© esz AG, 2018

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.36	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII Hochfrequenzmessgrößen	23