

XIII.5 HF-Dämpfung

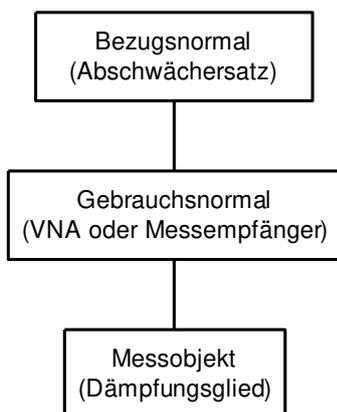
XIII.5.1 Kalibrierverfahren

XIII.5.1.1 Selektive Messung

Die Messung von HF-Dämpfungen im von den Einrichtungen des Labors abgedeckten Frequenzbereich wird an den vektoriellen Netzwerk-Analysatoren wie z.B. Hewlett Packard 8753C, Rohde & Schwarz ZNC3 und Agilent E8361A nach vollständiger 7- (UOSM) oder 12-Term-Kalibrierung (TOSM, siehe XIII.3) oder an einem selektiven Messempfängersystem wie E4440A/ N5532 (Verbundbezeichnung Agilent N5531S) durchgeführt. Als Bezugsnormale stehen kalibrierte Dämpfungsgliedersätze zur Verfügung, die sowohl zur Bestimmung der Linearitätseigenschaften als auch als Verifikationsnormale nach der Einkalibrierung der Systeme eingesetzt werden.

Das Kalibrierverfahren ist ein Direktmessverfahren im Bezug zur Durchgangsmessung bei Kurzschluss von Sender und Empfänger (THRU). Bei zeitnaher Durchführung von Bezugsmessung und Einfügen des Messobjektes kann ein Temperatureinfluss bei Umgebungsbedingungen und Kurzzeitstabilitäten von ± 1 K sehr klein gehalten werden werden. Wird das Messempfängersystem verwendet, so wird am Ausgang des Generators (z.B. R&S SMP02) mindestens ein 3 dB Präzisionsdämpfungsglied eingesetzt (z.B. Weinschel Modell 2) um Quelltoranpassung, Pintiefengeometrie und Konnektorzurückholbarkeit zu verbessern (ähnlich zu XIII.1.1.2). Zur Bestimmung der Wiederholbarkeit wird mindestens am Anfang und Ende der Messung der „Nullwert“ bestimmt, der für die Gültigkeit der Ergebnisse deutlich besser als 0,01 dB reproduzierbar sein muss.

Die Rückführung der Messgröße HF-Dämpfung erfordert das Vorhalten eines direkt rückgeführten Abschwächers oder Dämpfungsgliedersatzes als Bezugsnormal (siehe auch. EA-10/12:2000-3.3.1). Ein aus Einzelabschwächern (z.B. 3 dB, 6 dB, 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB) bestehender Abschwächersatz kann dann direkt oder durch entsprechende Kaskadierung für die Rückführung der Messgröße „Dämpfung“ oder „Anzeigelinearität“ (siehe XIII.5.6) Dynamikbereiche bis etwa 100 dB abdecken. Die abgeleitete Messgröße wird in diesem Fall also direkt über die Messgröße Dämpfung rückgeführt.



schematische Bezugsnormal-Rückführung über Abschwächer(-satz)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	1

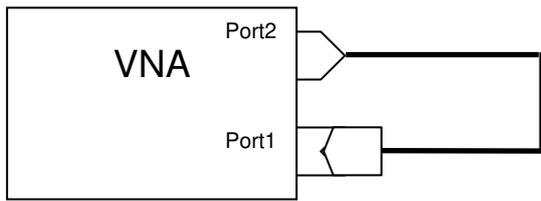


Bild XIII.5.1 THRU am VNA

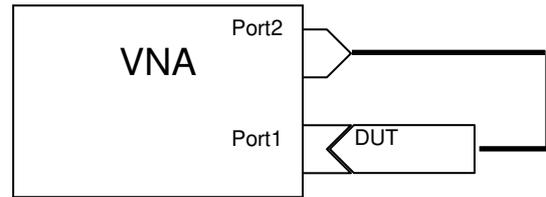


Bild XIII.5.2 Bestimmung der Dämpfung des Messobjekts

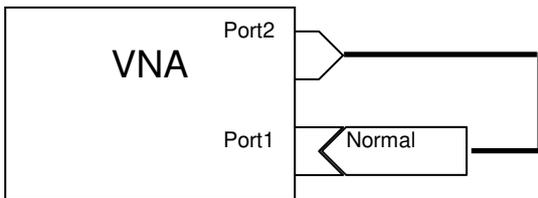


Bild XIII.5.3 Verifikation am Bezugsnormal

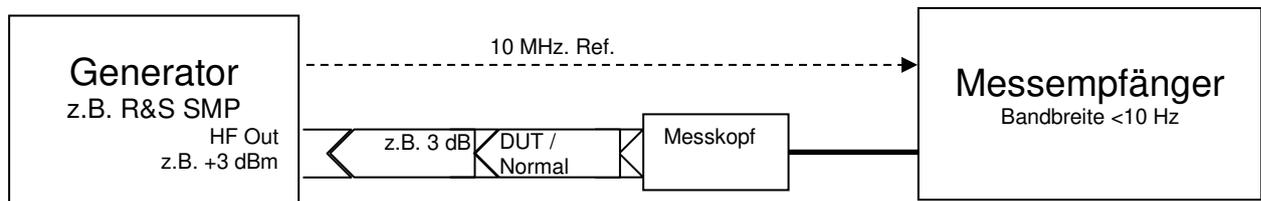
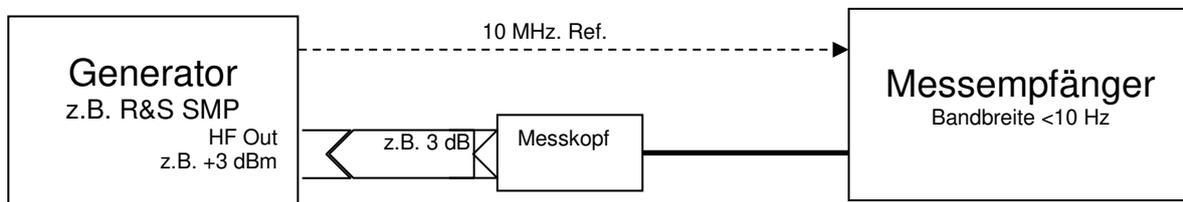


Bild XIII.5.5 Messung des Messobjekts bzw. Verifikation am Normal

XIII.5.1.1.1 Verifikation und Herstellung der Rückführbarkeit oder Kalibrierung der Anzeigeabweichung von Dämpfungsmessgeräten

Nach der Bezugsmessung gegen 0 dB-Durchgang, erfolgt vor der Messung üblicherweise eine Verifikation gegen mindestens eines der Bezugsnormale des Dämpfungsgliedersatzes ähnlichen Nennwertes (oder der Kaskadierung derer) zur Validierung der Messunsicherheit unter der Bedingung, dass Signifikanz dann gegeben ist, wenn die Bezugsnormalunsicherheit kleiner oder gleich der zu überprüfenden Unsicherheit sein muss. Eine Verifikation gilt als erfolgreich, sobald die Messabweichungen zwischen Verifikation $L_{\text{Verifikation}}$ und Normal L_{Normal} kleiner sind als die kombinierten Unsicherheiten der Messung $U_{\text{Verifikation}}$ und denen des Normals U_{Normal} (En-Werte kleiner als 1).

$$E_n = \frac{|L_{\text{Verifikation}} - L_{\text{Normal}}|}{\sqrt{U_{\text{Verifikation}}^2 - U_{\text{Normal}}^2}} \leq 1$$

Im Regelfall werden bei den Verifikationen deutlich kleinere Werte als 1 erzielt. Bei grenzwertigen Ergebnissen mit E_n -Werten $>0,8$ wird das Messsystem auf mögliche Fehler wie Verschleiß oder Verunreinigung der Kabel und Konnektoren geprüft.

Werden die Bezugsnormale am kalibrierten VNA gemessen, so erhält man also Aufschluss über die Qualität der Systemkorrektur bzw. die Abweichung und die zu erwartende Messunsicherheit, da die Unsicherheit dieser Messung im Wesentlichen durch die Unsicherheit der verwendeten

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	2

Bezugsnormale dargestellt wird, wenn angenommen werden kann, dass darin bereits ein Anpassfehler an einem „guten“ Messobjekt wie einem korrigierten VNA bereits enthalten ist:

$$U_{\text{Verifikation}} = \sqrt{U_{BN}^2 + U_{DUT}^2} = \sqrt{U_{BN}^2 + \left(U_{\text{noise}}^2 \left[+ U_{\text{cable}}^2 + U_{\text{mismatch}}^2 \right] \right)} \approx U_{BN}$$

U_{BN} Unsicherheit des Reflexionsfaktor des Verifikationsnormals aus dem Kalibrierschein (Normalverteilung, $k=2$)

U_{DUT} Beitrag des Messobjekts bzw. dessen Anschluss, zusammengesetzt aus Anzeigerauschen U_{noise} , Fehlanpassung U_{mismatch} und Einfluss der Kabelbiegung U_{cable} (vgl. XIII.5.2)

Das Verfahren kann somit auch zur Kalibrierung der Anzeigelinearität (Linearitätsabweichung) beliebiger Empfänger verwendet werden. Werden dabei Bezugsnormale aus demselben „Satz“ kaskadiert, sind diese üblicherweise korreliert.. Bei vollständiger Korrelation (Korrelationskoeffizienten gleich Eins, bspw. bei Verwendung von Dämpfungsgliedern eines Satzes und derselben Rückführkette) muss dann die Messunsicherheit jedes einzelnen Dämpfungsglieds linear in die Unsicherheit der Linearitätsmessung eingehen:

$$U_{Lin} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n U_{BN_i} \right)^2 + \left(U_{\text{noise}}^2 \left[+ U_{\text{cable}}^2 + U_{\text{mismatch}}^2 \right] \right)}$$

$$\approx \sum_{i=1}^n U_{BN_i}$$

U_{Lin} Unsicherheit der Anzeigeabweichung des Messobjektes (Unsicherheit der Linearitätsabweichung)

U_{BN_i} Unsicherheit des i-ten Dämpfungsnormals bei Kaskadierung mehrerer Dämpfungsglieder desselben Satzes unter Berücksichtigung deren Korrelation untereinander (identische Rückführung)

Bei Verwendung von Dämpfungsgliedern mit unterschiedlichen Rückführketten, also unkorrelierten Bezugswerten, wird die gewurzelte Quadratesumme als „kaskadierte“ Bezugsnormalunsicherheit verwendet.

Bei diesen Verfahren wird von der Austauschbarkeit mechanisch kompatibler Konnektoren (SMA, 3,5 mm und 2,92mm) in Bezug auf den Messwert der Dämpfung ausgegangen, da die entstehenden Einflüsse auf den Reflexionsfaktor im Rahmen der Gesamtunsicherheiten eine unwesentliche Rolle spielen.

Die Verifikation oder Linearitätskalibrierung mit größeren als den durch die Kaskadierung des Bezugsnormalsatzes erzeugbaren Dämpfungswerte lässt sich durch weitere Kaskadierung mit am Netzwerkanalysator ausgemessenen Gebrauchsnormalen realisieren (z.B. weitere 10 dB, 20 dB oder 30 dB).

XIII.5.1.2 Relative Kalibrierung mit HF-Leistungsmesskopf

Ähnlich zu Bild XIII.5.5 können ohne Zugriff auf das Messempeängersystem Dämpfungsglieder bis 30 dB an einem gut angepassten und linearem (Dioden-)Leistungsmesskopf kalibriert werden. Kleine Messunsicherheiten werden hierbei bei Einsatz einer spektral reinen Quelle wie R&S SMP02 oder SMP04 erzielt. Die Referenzierung erfolgt wie in Bild XIII.5.4 genauso direkt gegen einen Generator unter Berücksichtigung der Konnektorwiederholbarkeit. Da dieses Verfahren i.d.R größere Unsicherheiten als XIII.5.1.1 erzielt sind die Messunsicherheitsberechnungen der Kombinationen der Normale lediglich in den mitgeltenden XL-Tabellen hinterlegt. Sie wurden durch Kontrollmessungen an

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	3

kalibrierten oder eingemessenen Dämpfungsgliedern verifiziert oder durch diese Testmessungen deren Kenngrößen der zu erwartenden Unsicherheit ermittelt.

XIII.5.2 Messunsicherheit

Die Modellgleichung zur Bestimmung des Wertes L_X des Messobjektes im 50 Ω System in dB lässt sich formulieren zu:

$$L_X = \Delta L [+ \delta L_{BN}] + \delta L_{Lin} + \delta L_{Crosstalk} + \delta L_{Cable} + \delta L_{Conn} + \delta L_{Temp} + \Delta L_{MM}$$

mit

$\Delta L = L_{THRU} - L_X$	Dämpfungsdifferenz der Anzeige zwischen THRU und Messobjekt
L_{THRU}	Anzeige bei Durchgangsmessung
L_X	Anzeige bei Anschluss des Prüflings
δL_{BN}	Korrektur bedingt durch die Unsicherheit der Bezugsnormale (nur bei 1:1-Vergleich)
δL_{Lin}	Korrektur bedingt durch die Nichtlinearität des Empfängers
$\delta L_{Crosstalk}$	Korrektur bedingt durch Übersprechen oder Rauschen am Analysator
δL_{Cable}	Korrektur durch Einflüsse der Kabelbiegung
δL_{Conn}	Korrektur durch die Wiederholbarkeit der Konnektoren
δL_{Temp}	Korrektur durch Temperatureinfluss
ΔL_{MM}	Korrektur bedingt durch Fehlanpassungen (Mismatch)

Messunsicherheitsbilanz

ΔL_i Die Dämpfungsdifferenz zwischen Normal und Messobjekt wird aus den Anzeigewerten berechnet und besitzt als Zahlenwert nur die Unsicherheiten der Wiederholung des Messergebnisses (Typ-A Standardunsicherheit der Beobachtungen).

δL_{BN} Grundsätzlich steht das Verfahren in keiner kausalen Beziehung mit den exakten Werten der Bezugsnormale, die bei dieser Methode lediglich als Kontrollnormale eingesetzt werden. Bei einem „1:1-Vergleich“ identischer nominaler Dämpfungswerte ähnlich Bild XIII.5.3 wird jedoch die Unsicherheit ($k=2$, normalverteilt) dieser Kontrollmessung als Einflussgröße verwendet, da andernfalls die „weitergegebene“ Messunsicherheit tlw. deutlich die Unsicherheit der Kontrollmessung unterschreiten würde und eine sinnvolle Verifikation (Validierung des Verfahrens) auf Basis des En-Kriteriums nicht mehr möglich wäre.

δL_{Lin} Zur Bestimmung der Nichtlinearität wurden die Referenz-Dämpfungsglieder (siehe Kapitel II, Bezugsnormale, Pos. 25c) ausgemessen und die Abweichung zum Kalibrierwert in dB pro dB gemessener Dämpfung ermittelt (EA-10/12 Abschnitt 7.3.1).

Ermittelte Abweichungsgrenzen liegen dabei typischerweise unterhalb von $0,001 \text{ dB/dB} \cdot \Delta L$ (z. B. Agilent E8361A) bis 10 GHz bzw. $0,0012 \text{ dB/dB} \cdot \Delta L$ bis 18 GHz und $0,002 \text{ dB/dB} \cdot \Delta L$ bis 40 GHz. Diese enthalten die Einflüsse des messbandbreitenabhängigen Empfängerrauschens und weiterer Nichtlinearitäten.

Am Messempfängersystem ergeben sich laut Hersteller an den Umschaltgrenzen des internen Abschwächers bei 60 dB bzw. bei Zuschalten des Vorverstärkers bei 80 dB Dämpfung zusätzliche Beiträge durch den Eigenabgleich an diesen Schwellen. Diese Einflüsse konnten zwar bei der Nichtlinearitätsbestimmung nicht signifikant nachgewiesen werden, werden jedoch mit einem maximalen Einfluss von jeweils zusätzlichen 0,005 dB basierend auf der Kurzzeitstabilität beim Eigenabgleich abgeschätzt.

Bei einem „1:1-Vergleich“ identischer nominaler Dämpfungswerte ähnlich Bild XIII.5.3 (Verifikation am Bezugsnormal) lässt sich der Linearitätsfehler als Differenz der bekannten Werte des Bezugsnormals und der Messwerte abschätzen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	4

$\delta L_{Crosstalk}$

Durch Übersprechen oder Rauschen (Signal zu Rauschabstand) bedingte Korrektur auf die eingesetzten Empfänger. Die Ermittlung der maximalen Werte des Übersprechens CT in dB erfolgt durch Abschluss der Tore mit 50Ω möglichst bei angeschlossenem Messkabel. Die Auswirkung auf die Messunsicherheit kann formuliert werden zu:

$$|\delta L_{Crosstalk}| \leq 20 \log \left(1 + 10^{\frac{L_x - CT}{20}} \right)$$

δL_{Cable}

Der Einfluss durch die Kabelbiegung ist z.T. bereits in den Beobachtungen enthalten und hängt vom verwendeten Kabeltyp und der Messfrequenz ab. Für die Berechnung der Messunsicherheit können typische Werte von 0,002 dB (bis 4 GHz), 0,005 dB (bis 12 GHz) und 0,01 dB (bis 40 GHz) angenommen werden.

δL_{Conn}

Von Frequenz, Messobjekt und Steckerqualität abhängig ist die Wiederholbarkeit der Steckverbindung. Deren Unsicherheit ist z.T. in der Standardunsicherheit der Beobachtungen enthalten, indem der Prüfling in verschiedenen um 120° oder 90° axial gedrehten Positionen gemessen wird, d.h. die Steckverbindung gelöst und wieder neu verschraubt wird. Typische Werte bei sorgfältiger Handhabung sind dabei Maximalgrenzen von 0,004 dB (bis 4 GHz), 0,008 dB (bis 18 GHz) und 0,01 dB (bis 40 GHz).

δL_{Temp}

Der Temperatureinfluss wurde durch Beobachtung der 0 dB-Linie über 15 Minuten gemessen. Es wurde festgestellt, dass dieser im gesamten Frequenzbereich unter 0,005 dB liegt.

ΔL_{MM}

An den Ein- und Ausgängen sowohl bei THRU-Messung als auch des Messobjektes DUT treten Unsicherheiten durch Fehlanpassung auf. Der Netzwerkanalysator wird nach einer vollständigen Kalibrierung diese Einflüsse durch die Systemdatenkorrektur bereits auf die effektiven Quell- und Lasttoreinflüsse optimieren, am Messempfängersystem müssen diese Einflüsse anhand der gemessenen Messkopflexion und einer angenommenen Generatorreflexion abgeschätzt werden. Die Korrektur ΔL_{MM} repräsentiert die Summe aller systematischen Einflüsse, die von den effektiven Anpassungen des Senders des Messsystems $\Gamma_{Sys,Q}$, des Empfängers $\Gamma_{Sys,L}$ und den S-Parametern des jeweiligen Dämpfungsgliedes S_{xx} verursacht werden. Für die Bestimmung eines Messobjektes nach Durchgangskalibrierung gilt [20]:

$$\Delta L_{MM} = 20 \log \frac{1 + \left(|\Gamma_{Sys,Q} S_{11}| + |\Gamma_{Sys,L} S_{22}| + |\Gamma_{Sys,Q} \Gamma_{Sys,L} S_{11} S_{22}| + |\Gamma_{Sys,Q} \Gamma_{Sys,L} S_{21} S_{12}| \right)}{1 - |\Gamma_{Sys,Q}| |\Gamma_{Sys,L}|}$$

Die Reflexionsfaktoren des Messobjektes können gemessen werden, die effektiven Systemdaten der Netzwerkanalysatoren sind bekannt. Am Messempfängersystem erfolgt eine Abschätzung auf Basis der Lastanpassung des verwendeten Messkopfes und der angenommenen Quelltoranpassung des Generators.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	5

XIII.5.3 Beispiel und tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Kalibrierung eines 55 dB Dämpfungsgliedes am Netzwerkanalysator Agilent E8361A bei einer Frequenz von 1 GHz nach Verifikation zu einer Bezugsnormalkaskadierung aus 10 dB und 40 dB. Die Reflexionsfaktoren des Messobjektes wurden zusammen mit der Unsicherheit der Reflexionsmessung zu maximal $S_{xx}=0,05$ bestimmt. Das Übersprechen und Empfängerrauschen bei einer Messbandbreite von 100 Hz wurde gemessen und beträgt mindestens 115 dB. Für die Berechnung der Fehlanpassungsunsicherheit sind die Systemdaten

$|Γ_{Sys,Q}|$ effektive Quelltoranpassung des NWA =0,005
 $|Γ_{Sys,L}|$ effektive Lasttoranpassung des NWA =0,005
 bekannt.

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
$ΔL_x$	55,05 dB					
$δL_{Lin}$	0 dB	0,0008 dB ·55	Rechteck	$\frac{0,044 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0254 dB
$δL_{Crosstalk}$	0 dB	0,009 dB	Rechteck	$\frac{0,009 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0050 dB
$δL_{Cable}$	0 dB	0,002 dB	Rechteck	$\frac{0,002 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0012 dB
$δL_{Conn}$	0 dB	0,004 dB	Rechteck	$\frac{0,002 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0023 dB
$δL_{Temp}$	0 dB	0,005 dB	Rechteck	$\frac{0,005 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0029 dB
$ΔL_{MM}$	0 dB	0,0046 dB	U-verteilt	$\frac{0,0046 \text{ dB}}{\sqrt{2}}$	1	0,0032 dB
$ΔL_x$	55,05 dB			$u(ΔL_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,0264 dB
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$U(ΔL_x) = k \cdot u(ΔL_x)$		0,053 dB

Alternativ zur Bilanzbildung gemäß Abs. XIII.5.2 kann die Messunsicherheit einer Kalibriereinrichtung auch direkt aus den Verifikationsmessungen bei Auswertung ausreichender Stichproben verschiedener Bezugswerte abgeschätzt werden. Sie ergibt sich dann zu

$$U_{PM} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{BN}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{PM}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

U_{BN} Unsicherheit des Reflexionsfaktor des Verifikationsnormals aus dem Kalibrierschein (Normalverteilung, k=2)

Δ_{PM} maximaler Betrag der beobachteten Differenz zwischen allen Referenzwerten verschiedener Dämpfungsnormale und an der Kalibriereinrichtung (Prüfmittel, z. B. NWA) gemessenen Werten als Grenze einer Rechteckverteilung

XIII.5.6 HF-Dämpfung – Anzeigelinearität

Anzeigelinearität mit (Stufen-)Abschwächer als Normal¹

Die Kalibrierung der Anzeigelinearität, z.B. von Spektrumanalysatoren oder Messempfängern erfordert die stufenweise Messung der Anzeige bei bekannter Abschwächung des Eingangssignals. Die Kalibrierung erfolgt nach den in VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.5 bzw. VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-12:2003 Abs. 3.2.4 genannten Verfahren mit Hilfe schaltbarer externer Stufenabschwächer oder (kaskadierter) Dämpfungsglieder (Unsicherheitsbetrachtung siehe Abs. XIII.5.1.1.1). Der Kalibriergegenstand kann dabei ein beliebiger HF-Empfänger sein, in der weiteren Beschreibung wird jedoch von den typischen Messobjekten „Spektrumanalysator“ oder „Messempfänger“ ausgegangen. Daneben kann das auf die Messgröße HF-Leistung bzw. Wechselspannung rückgeführte Verfahren aus XIII.2.7.2 für die Messung der Anzeigelinearität oder ein kalibrierter Leistungsmesskopf im Vergleich (XIII.2.1.3) verwendet werden. Diese Verfahren können nur einen maximalen Dynamikbereich von 60 dB oder deutlich weniger abdecken. Für die Kalibrierung mit einem (Stufen-)Abschwächer als Normal können Bereiche bis zu 120 dB oder durch weitere Kaskadierung sogar darüber abgedeckt werden.

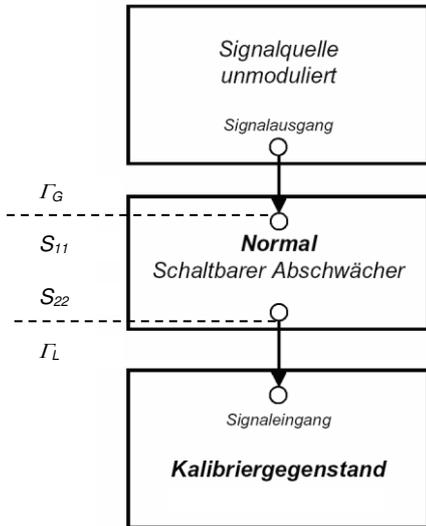
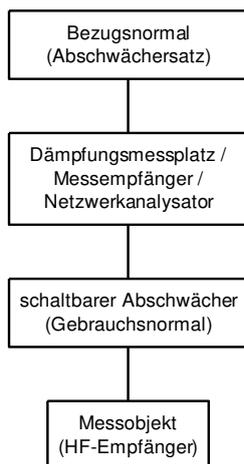


Bild XIII.5.6.1 Messaufbau Kalibrierung der Anzeigelinearität [7]

In der Praxis wird die Kalibrierung der Anzeigelinearität also nicht mit kaskadierten Bezugsnormen durchgeführt. Stattdessen werden schaltbare Abschwächer guter Wiederholbarkeit zum Beispiel wie oben genannt als Gebrauchsnormal eingesetzt, die kein wiederholtes Lösen und

Herstellen der Konnektorverbindungen erfordern. Die Charakterisierung der Dämpfungsstufen relativ zur Bezugseinstellung (z.B. 3 dB) eines solchen schaltbaren Abschwächers erfolgt am Messempfängersystem (Dämpfungsmessplatz) oder vektoriiellen Netzwerkanalysator im besten Dynamikbereich mit kleiner Messunsicherheit. Deren Nichtlinearität oder Messabweichungen im Transfer über eine Bezugsnormalkalibrierung gemäß XIII.5.1.1 sind bekannt und somit rückgeführt. Die abgeleitete Messgröße „Anzeigelinearität“ wird dann also in zwei Schritten über die Messgröße Dämpfung rückgeführt. Durch weitere Kombination mit Bezugs- oder Gebrauchs-Dämpfungsgliedern ist eine fast beliebige Erweiterung des Dynamikbereiches möglich.



schematische Gebrauchsnormal-Rückführung über (Transfer-)Messempfänger

Die Kalibrierwerte des Abschwächers sind damit rückführbar auf die in den Kapiteln XIII.5.1 genannten Verfahren und können mit ihren berechneten Unsicherheiten dargestellt werden.

¹ vgl. auch XIII.2.7.2, Kalibrierung mit Linearitätsnormal und Abs. XIII.5.1.1.1

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	7

Die Zahl der Messfrequenzen und Messpunkte erfolgt entweder in Absprache mit dem Kunden, in Anlehnung an den „Performance Test“ des Herstellers bzw. an die Werksrichtlinien für Kalibrierumfang (Auswahl der Messpunkte). Üblicherweise wird bei 50 MHz in 5 dB Schritten oder 10 dB Schritten gemessen.

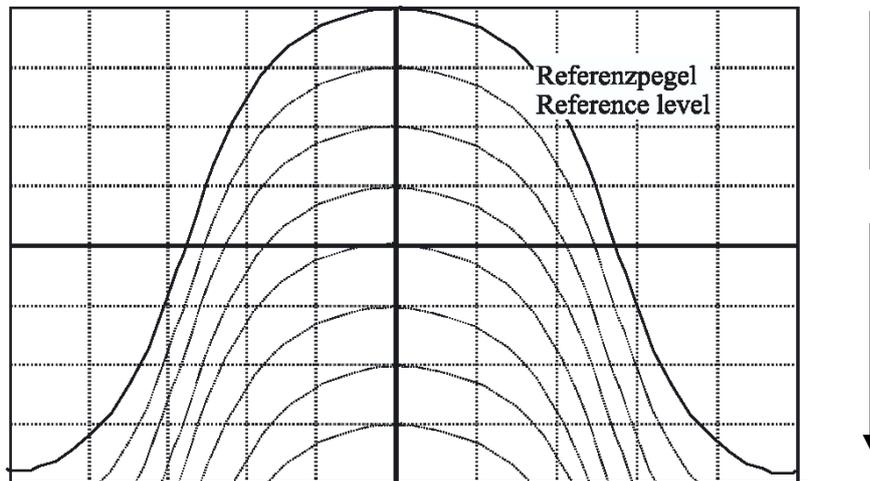


Bild XIII.5.6.2 Anzeige am Spektrumanalysator bei Kalibrierung der Anzeigelinearität [7]

XIII.5.6.1 Messunsicherheitsbilanz

Die Unsicherheit beim Einsatz kaskadierter (Bezugs-)Dämpfungsnormale kann nach Abschnitt XIII.5.1.1.1 abgeschätzt werden. Allgemein formuliert Sie sich anhand der

Modellgleichung

$$\Delta L_{DUT} = \Delta L_{Normal} - \Delta L_{Lin} + \delta L_{Noise} + \delta L_{Temp} + \delta L_{Res} + \Delta L_{MM}$$

mit

- $\Delta L_{DUT} = L'_{DUT} - L_{DUT}$ Anzeigedifferenz zwischen Anzeige in Ausgangsstellung L'_{DUT} und Anzeige in Messstellung L_{DUT}
- L'_{DUT} Anzeige des Kalibriergegenstandes in Ausgangsstellung
- L_{DUT} Anzeige des Kalibriergegenstandes beim Kalibrierwert
- ΔL_{Lin} Linearitätsabweichung des Kalibriergegenstandes
- ΔL_{Normal} eingestellte Dämpfungsdifferenz des Normals
- δL_{Noise} Korrektur durch das Eigenrauschen des Kalibriergegenstandes
- δL_{Temp} Korrektur durch Temperatureinfluss
- δL_{Res} Korrektur durch die Anzeigauflösung
- ΔL_{MM} Korrektur bedingt durch Fehlanpassungen (Mismatch)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	8

ΔL_{Normal} Die Dämpfungsdifferenz des Normals bezüglich der verwendeten Referenz (z. B. „THRU“ oder 3 dB-Stufe eines Stufenabschwächers) ist bekannt und wird gemäß den in den Kapiteln XIII.5.1 bis XIII.5.3 genannten Verfahren bestimmt. Die Reproduzierbarkeit der Steckverbindung oder Schalterstellung liegt dabei meist deutlich unter 0,01 dB. Diese Werte wurden üblicherweise jedoch bereits bei der Kalibrierung des Abschwächers berücksichtigt und sind in dessen Unsicherheit bereits enthalten.

δL_{Noise} Das Eigenrauschen des Kalibriergegenstandes liefert einen erheblichen Anteil zur Unsicherheit, ist jedoch vom Kalibriergegenstand abhängig. Abweichend zu XIII.5.2 errechnet sich der Einfluss (Halbbreite) abhängig vom Signal-zu-Rauschabstand (SNR) bei der Betrachtung von Leistungsverhältnissen zu

$$|a_{noise}| \leq \left| 10 \log \left(1 + 10^{\frac{-SNR}{10}} \right) \right|$$

Für die Unsicherheitsberechnung wird bei einem Signal zu Rauschabstand von mindestens 25 dB z. B. von einem maximalen Unsicherheitsintervall von 0,014 dB ausgegangen.

δL_{Temp} Temperaturschwankungen im Rahmen von maximal ± 1 K während der Messung liefern nur einen unsignifikanten Beitrag von maximal 0,005 dB (Ermittlung durch Stabilitätsmessung am eigenen Messempfängersystem) zur Unsicherheit.

δL_{Res} Die Anzeigauflösung und „Digitschwankung“ typischer Kalibriergegenstände bei Mittelwertbildung über >10 Messungen („Sweeps“) kann üblicherweise besser als 0,005 dB angenommen werden.

ΔL_{MM} Die Fehlanpassung aufgrund der Quell-, Last-, Ein- und Ausgangsreflexionen (Generator Γ_G , Last Γ_L) zwischen Referenzmessung (Ausgangsstellung, oder THRU S'_{ij}) und Messstellung (S_{ij}) kann einen wesentlichen Anteil der Messunsicherheit darstellen. Der Fehlanpassungsterm in dB formuliert sich bei der Kalibrierung eines (einkalibrierten) VNA gemäß Abs. XIII.5.2 und sonst als

$$\Delta L_{MM} = 20 \log \frac{1 + (|\Gamma_G S_{11}| + |\Gamma_L S_{22}| + |\Gamma_G \Gamma_L S_{11} S_{22}| + |\Gamma_G \Gamma_L S_{21} S_{12}|)}{1 - |S'_{11} \Gamma_G| - |S'_{22} \Gamma_L| - |\Gamma_G \Gamma_L| (|S'_{12} S'_{21}| - |S'_{11} S'_{22}|)}$$

Reflexionsfaktoren des Kalibriergegenstandes werden gemessen (ggf. zusammen mit den verwendeten Messkabeln). Dabei genügt es den Wert für die verwendete interne Abschwächerstufe oder des kleinsten internen Abschwächers zu bestimmen, da dieser den Reflexionsfaktor maximal begrenzen wird. Die übrigen Abschwächerstufen werden auf diese Annahme hin überprüft, solange deren Reflexionsfaktoren unterhalb des maximal auftretenden Wertes liegen, kann die Abschätzung der Unsicherheit mit diesem maximalen Wert für alle Stufen erfolgen. Die Reflexionsfaktoren (S'_{ij} und S_{ij}) des verwendeten schaltbaren Abschwächers sind bekannt (sie beziehen sich auf das Normal) und die des Generators werden entsprechend XIII.5.4 abgeschätzt.

XIII.5.7 HF-Dämpfung – interne Abschwächer

Die Kalibrierung von Messempfängern oder Spektrumanalysatoren erfordert die Kalibrierung deren interner Abschwächer und deren Umschaltabweichung. Die Durchführung kann bei ausreichendem Signal zu Rauschabstand durch Durchschalten der Abschwächerstufen (XIII.5.6.1) bei konstanter Eingangsleistung oder mit einem externen Abschwächer als Normal und variabler Eingangsleistung erfolgen (vgl. [7] Abs. 3.2.2).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	9

XIII.5.7.1 interne Abschwächerkalibrierung durch stufenweisen Anzeigevergleich

An den Signaleingang wird eine konstante HF-Quelle angeschlossen. Für Verbesserung der Anpassungsverhältnisse wird diese beispielsweise über ein zusätzliches Dämpfungsglied („3 dB-Pad“) oder eine schaltbare Dämpfungsgliedkombination am Ausgang an den Eingang des Kalibriergegenstandes angeschlossen. Bei höheren Frequenzen >2 GHz ist diese zusätzliche Dämpfung ggf. zu erhöhen. Das Verfahren wird genutzt, um die Umschaltabweichung der internen Dämpfungsglieder zu charakterisieren.

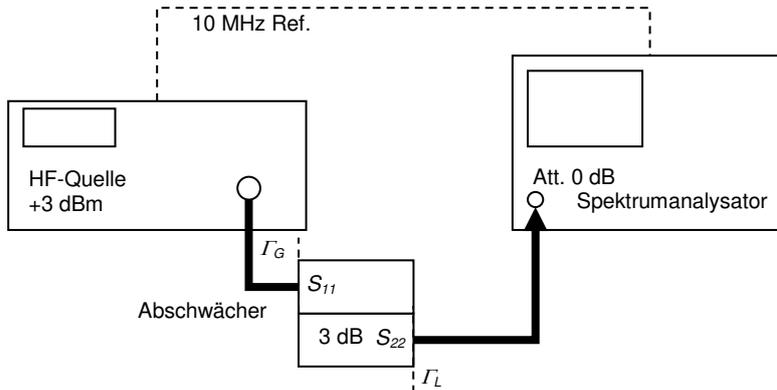


Bild XIII.5.7.1.1 Ausgangs-/Referenzstellung des Kalibrieraufbaus. Die Einstellungen an Signalgenerator und schaltbarem Dämpfungsglied werden im weiteren Verlauf nicht mehr verändert

Werden bei konstanter Eingangsleistung die Abschwächerstufen beginnend von 0 dB bis zur maximalen Einstellung durchgeschaltet, so darf sich die Anzeige am Kalibriergegenstand bei ausreichendem Signal zu Rauschabstand (min. 50 dB) nicht verändern. Alle Einstellungen an Aufbau und Kalibriergegenstand (Referenzpegel, Span, Mittenfrequenz, Bandbreite, etc.) bleiben unverändert, lediglich der Abschwächer wird geschaltet. Dieses Verfahren ist v.a. geeignet bei Geräten mit sehr kleiner Rauschanzeige und guter Nichtlinearität (typische Nichtlinearität <0,01 dB + 0,005 dB/ 10 dB).

Für die Bestimmung der relevanten Reflexionsfaktoren genügt es den maximalen Wert für die internen Abschwächerstufe i.d.R. den des kleinsten internen Abschwächers oder ohne internen Abschwächer zu bestimmen, da dieser den Reflexionsfaktor maximal begrenzen wird. Die übrigen Abschwächerstufen werden auf diese Annahme hin überprüft, solange deren Reflexionsfaktoren unterhalb des maximal auftretenden Wertes liegen kann die Abschätzung der Unsicherheit mit diesem maximalen Wert für alle Stufen erfolgen.

XIII.5.7.1.1 Messunsicherheitsbilanz

Modellgleichung

$$L_{DUT} = L_{nom} + \Delta L_{Anz} + \delta L_{Noise} + \delta L_{Temp} + \delta L_{Res} + \delta L_{Rep} + \delta L_{Lin} + \Delta L_{MM}$$

mit

- L_{DUT} Wert des internen Abschwächers des Kalibriergegenstandes
- L_{nom} nominelle Einstellung des Abschwächers
- $\Delta L_{Anz} = L'_{Anz} - L_{Anz}$ Differenz zwischen Anzeige in Ausgangsstellung L'_{DUT} und Anzeige in Messstellung L_{DUT}
- L'_{Anz} Anzeige des Kalibriergegenstandes in Ausgangsstellung
- L_{Anz} Anzeige des Kalibriergegenstandes beim Kalibrierwert
- δL_{Noise} Korrektur durch das Eigenrauschen des Kalibriergegenstandes
- δL_{Temp} Korrektur durch Temperatureinfluss
- δL_{Res} Korrektur durch die Anzeigauflösung
- δL_{Rep} Wiederholgenauigkeit der Abschwächerstufen
- δL_{Lin} Korrektur durch die Empfängerlinearität
- ΔL_{MM} Korrektur bedingt durch Fehlanpassungen (Mismatch)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	10

Die Einflussgrößen werden wie in XIII.5.6.1 geschätzt. Des Weiteren werden angenommen:

δL_{Lin} Die Nichtlinearität des Empfängers ist vom Kalibriergegenstand abhängig und kann gemäß XIII.5.6 gemessen werden. Die ermittelten Werte werden als maximale Intervallgrenzen z.B. 0,01 dB + 0,005 dB / 10 dB verwendet.

ΔL_{MM} ΔL_{MM} ergibt sich im schlechtesten Fall als Summe der Fehlanpassungsunsicherheit zwischen Generator und Last in Referenzstellung und Messstellung

$$\Delta L_{MM} \approx \sqrt{(20 \log(1 + |\Gamma'_G \Gamma'_L|))^2 + (20 \log(1 + |\Gamma_G \Gamma_L|))^2}$$

XIII.5.7.1.2 Beispiel und tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Kalibrierung des internen Abschwächers eines Spektrumanalysators bei einer Frequenz von 50 MHz und nomineller Einstellung von 70 dB gegen die 0 dB-Stellung des internen Abschwächers mit zwischen geschaltetem Stufenabschwächer Hewlett Packard 8496B/8494B in 3 dB-Stellung und Generator Rohde & Schwarz SMP04. Der Reflexionsfaktor der Abschwächerstufen wurde zu maximal $|\Gamma'_L|=0,028$ (0 dB Abschwächer) und $|\Gamma_L|=0,015$ (Stufen > 3 dB) bestimmt. Die Wiederholpräzision wurde besser 0,01 dB ermittelt.

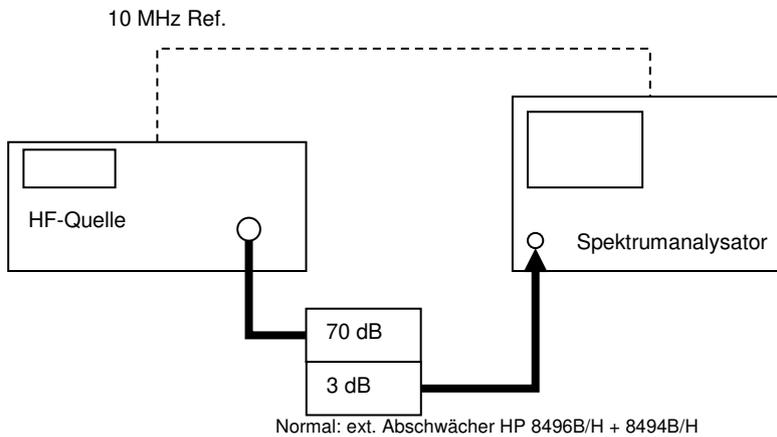
Das Eigenrauschen des Kalibriergegenstandes wurde zuvor zu >134 dBm gemessen wodurch sich ein Signal zu Rauschabstand von 64 dB errechnet. Weitere Einstellungen am Spektrumanalysator sind: Referenzpegel 0 dBm, Bandbreite 10 Hz, Span 50 Hz, Mittenfrequenz 50 MHz. Spektrumanalysator und Generator sind frequenzsynchronisiert (ext. 10 MHz Referenz).

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
L_{nom}	70,00 dB					
ΔL_{Anz}	0,04 dB					
δL_{Noise}	0 dB	0,0032 dB	Rechteck	$\frac{0,0032 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0018 dB
δL_{Temp}	0 dB	0,005 dB	Rechteck	$\frac{0,005 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0029 dB
δL_{Res}	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,01 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0058 dB
δL_{Rep}	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,02 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0115 dB
δL_{Lin}	0 dB	0,045 dB	Rechteck	$\frac{0,045 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0260 dB
ΔL_{MM}	0 dB	0,0071 dB	U-verteilt	$\frac{0,020 \text{ dB}}{\sqrt{2}}$	1	0,0050 dB
L_{DUT}	70,05 dB			$u(L_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,0277 dB
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$U(L_{DUT}) = k \cdot u(\Delta L_{DUT})$		0,06 dB

X

XIII.5.7.2 Abschwächerkalibrierung im Vergleich zu externem Dämpfungsglied

Das Verfahren wird gemäß VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.2 [7] durchgeführt und es wird als Referenzstellung die im Datenblatt angegebene interne Abschwächerstellung als Standardstellung des Gerätes gewählt. Am externen Normal wird die Referenzstellung „gegengleich“ zur maximal möglichen internen Abschwächerstellung eingestellt. Wird der interne Abschwächer um eine Stufe erhöht, muss der externe Abschwächer um diesen Betrag verringert werden:



- Spektrumanalysator auf minimale Abschwächereinstellung bringen (0 dB)
- externes Dämpfungsglied auf max. Wert des internen Abschwächers einstellen
- Anzeige L'_{Anz} bei Referenzwert aufnehmen
- Abschwächereinstellung am Spektrumanalysator um eine Stufe erhöhen (z.B. 10 dB)
- externen Abschwächer um identischen Wert verringern
- Anzeige L_{Anz} aufnehmen und Differenz $\Delta L_{Anz} = L'_{Anz} - L_{Anz}$ mit Dämpfungsdifferenz des Normals vergleichen

Der externe Abschwächer ist dafür gemäß XXIII.5.1 gegen seine Ausgangsstellung kalibriert, die Werte anderer Ausgangsstellungen können errechnet werden (es lässt sich zeigen, dass die Unsicherheit der Dämpfungsdifferenzen aufgrund der Korrelationen immer dieselbe Größe hat).

XIII.5.7.2.1 Messunsicherheitsbilanz

Modellgleichung

$$L_{DUT} = \Delta L_{Anz} + L_{nom} + \Delta L_{ext} + \delta L_{Noise} + \delta L_{Temp} + \delta L_{Res} + \delta L_{Rep} + \delta L_{Lin} + \Delta L_{MM}$$

mit

L_{DUT}	Wert des internen Abschwächers des Kalibriergegenstandes
L_{nom}	nominelle Einstellung des internen Abschwächers
$\Delta L_{Anz} = L'_{Anz} - L_{Anz}$	Differenz zwischen Anzeige in Ausgangsstellung L'_{DUT} und Anzeige in Messstellung L_{DUT}
L'_{Anz}	Anzeige des Kalibriergegenstandes in Ausgangsstellung
L_{Anz}	Anzeige des Kalibriergegenstandes beim Kalibrierwert
$\Delta L_{ext} = L'_{ext} - L_{ext}$	Dämpfungsdifferenz des externen Abschwächer bezogen auf die Ausgangsstellung
δL_{Noise}	Korrektur durch das Eigenrauschen des Kalibriergegenstandes
δL_{Temp}	Korrektur durch Temperatureinfluss
δL_{Res}	Korrektur durch die Anzeigauflösung
δL_{Rep}	Wiederholgenauigkeit der Abschwächerstufen
δL_{Lin}	Korrektur durch die Nichtlinearität des Empfängers
ΔL_{MM}	Korrektur bedingt durch Fehlanpassungen (Mismatch)

Identische Einflussgrößen werden wie in XIII.5.6.1 angegeben.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	12

δL_{Lin} Die Nichtlinearität des Empfängers wird wie in XIII.5.6 ermittelt, bei kleinen Pegelunterschieden sollte diese jedoch vernachlässigbar klein bleiben

XIII.5.7.2.2 Beispiel und tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Kalibrierung des internen Abschwächers eines Spektrumanalysators bei einer Frequenz von 50 MHz und nomineller Einstellung von 70 dB gegen die „73 dB auf 3 dB“-Stellung des externen Stufenabschwächer Hewlett Packard 8496B/8494B und Generator Rohde & Schwarz SMP04. Die Werte des Abschwächers und Spektrumanalysators ergaben sich zu

S'_{11}	Eingangsreflexionsfaktor in 73 dB Ausgangsstellung	0,015
S'_{22}	Ausgangsreflexionsfaktor in 73 dB Ausgangsstellung	0,011
S_{11}	Eingangsreflexionsfaktor in 3 dB Kalibrierstellung	0,014
S_{22}	Ausgangsreflexionsfaktor in 3 dB Kalibrierstellung	0,015
ΔL_{ext}	Eingestellte Dämpfungsdifferenz von 73 dB auf 3 dB	70,19 dB
$ \Gamma_L^* $	Reflexionsfaktor des Spektrumanalysators bei 0 dB-Stellung des internen Abschwächers	0,028
$ \Gamma_L $	Reflexionsfaktor des Spektrumanalysators bei 70 dB-Stellung des internen Abschwächers	0,015

Das Eigenrauschen des Kalibriergegenstandes wurde zuvor zu >134 dBm gemessen wodurch sich ein Signal zu Rauschabstand von 64 dB errechnet.

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
L_{nom}	70,00 dB					
ΔL_{ext}	70,19 dB	0,06 dB	Normal	$\frac{0,06 \text{ dB}}{2}$	1	0,0300 dB
ΔL_{Anz}	70,25 dB					
δL_{Noise}	0 dB	0,0032 dB	Rechteck	$\frac{0,0032 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0018 dB
δL_{Temp}	0 dB	0,005 dB	Rechteck	$\frac{0,005 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0029 dB
δL_{Res}	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,01 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0058 dB
δL_{Rep}	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,01 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0058 dB
δL_{Lin}	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,01 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0058 dB
ΔL_{MM}	0 dB	0,0138 dB	U-verteilt	$\frac{0,019 \text{ dB}}{\sqrt{2}}$	1	0,0098 dB
L_{DUT}	69,94 dB			$u(L_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,0333 dB
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$U(L_{DUT}) = k \cdot u(\Delta L_{DUT})$		0,07 dB

Die Einflussgrößen sind XIII.5.6.3 entnehmbar.

XIII.5.7.2.3 Referenzpegel (ZF-Verstärkung)

Es lässt sich zeigen, dass das in VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.4 genannte Verfahren für die Referenzpegelkalibrierung mit identischen Unsicherheitsanteilen dargestellt werden kann.

XIII.5.8 Filtereigenschaften von Selektionsfiltern

XIII.5.8.1 Bandbreite

Die Kalibrierung von Messempfängern oder Spektrumanalysatoren (SA) erfordert die Kalibrierung der Filtereigenschaften der Selektionsfilter. Bestimmt wird bei der Filterbandbreite der Frequenzabstand zwischen den 3 dB (oder 6 dB) Punkten der dargestellten Messkurve eines (schmalbandigen) Sinussignals. Die Kalibrierung erfolgt nach dem in VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.6 genannten Verfahren üblicherweise bei einer Mittenfrequenz von 50 MHz.

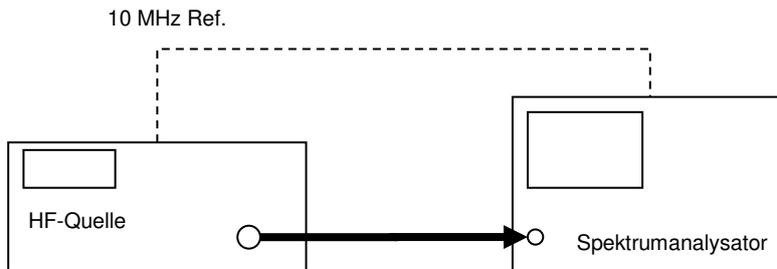
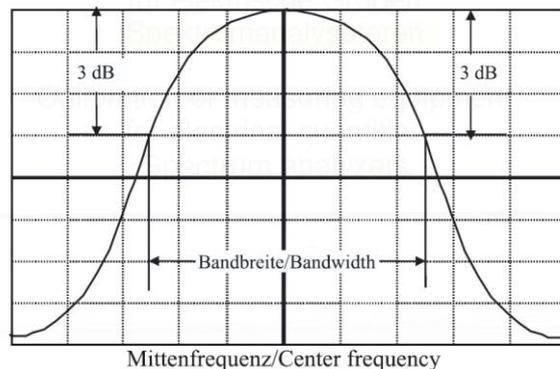


Bild XIII.5.8.1.1 Kalibrieraufbau zur Kalibrierung der Filtereigenschaften von Spektrumanalysatoren oder Messempfängern

Einstellungen und Kalibrierablauf am Spektrumanalysator (Beispiel):

- Mittenfrequenz auf Bezugsfrequenz einstellen (z.B. 50 MHz)
- Eingangsabschwächer auf 10 dB einstellen
- Referenzpegel (oberste Skalierungslinie) auf Bezugspegel einstellen (z.B. Pegel des Kalibriergenerators)
- Skalierung auf 1 dB/Div einstellen
- entsprechende Span/Div einstellen (Bild 12 so groß wie möglich)
- größte Bandbreite einstellen
- Ablenkzeit passend zur gewählten Bandbreite einstellen
- Am Synthesizer gleiche Frequenz wie Mittenfrequenz einstellen.
- 3 dB-Bandbreite ermitteln.



Kalibrierung der Filterbandbreite von Spektrumanalysatoren (VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.6)

Da sowohl die Ablesung der Frequenz als auch der Leistungsdifferenz (Dämpfung) zwischen Maximum und 3 dB-Punkten am Messobjekt selbst erfolgt muss der Kalibriergegenstand vor dieser Messung bezüglich Leistung (Frequenzgang), Dämpfung (Linearität) und Frequenz (Markerabweichung) kalibriert worden sein, damit die Rückführung auf die Messgrößen Dämpfung und Frequenz garantiert werden kann. Die Frequenzabweichung des Normals bzw. des Kalibriergegenstandes liefert jedoch nur einen unwesentlichen Anteil zur Gesamtunsicherheit, oft können sogar Generator und Messobjekt synchronisiert werden, so dass sich keine zusätzlichen relativen Abweichungen ergeben.

XIII.5.8.1.1 Modellgleichung

$$BB = BB_{gemessen} \cdot 2 \cdot \left(K_f \cdot \left((K_{Lin} \cdot K_{dB} \cdot K_{noise} \cdot K_{Res,dB}) \cdot E_f \right) \cdot K_{Res,f} \right)$$

Der Faktor 2 berücksichtigt die Tatsache, dass die Bandbreite $BB_{gemessen}$ aus zwei Markermessungen (Delta links und rechts der Mittenfrequenz) ermittelt wird.

mit

- BB gesuchte Bandbreite
- $BB_{gemessen}$ gemessene/ ermittelte Bandbreite
- K_f Korrektionsfaktor aufgrund der Frequenzunsicherheit
- K_{dB} Korrektionsfaktor durch Frequenzgang des Kalibriergegenstandes=Normals

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	14

K_{Lin}	Korrektionsfaktor durch die Nichtlinearität des Normals
E_f	Empfindlichkeitsfaktor durch die Steilheit des Filters
K_{noise}	Korrektur durch Eigenrauschen
$K_{Res,dB}$	Korrektur durch die begrenzte Pegelauflosung bei der Messung
$K_{Res,f}$	Korrektur durch die begrenzte Frequenzauflösung bei der Messung
K_f	Das Frequenznormal kann ein verstimmbarer Signalgenerator oder der Kalibriergegenstand selbst sein. Hierdurch werden Unsicherheitsintervalle erzeugt die i.d.R. deutlich unter $1 \cdot 10^{-6}$ liegen.
K_{dB}	Durch den Frequenzgang des Kalibriergegenstandes im Bereich des eingestellten Spans entsteht ein Unsicherheitsbeitrag. Der Frequenzgang wird gemessen: In kleinen Intervallen kann davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Differenzen zwischen Referenzfrequenz und Bandbreitenpunkt einen Wert von 0,03 dB nicht übersteigen.
K_{Lin}	Die Linearitätsabweichung des Kalibriergegenstand wird gemessen und geht bis zum 3 dB-Wert in das Messergebnis mit. Bei Annahme maximaler Abweichungen von 0,01 dB+0,005 dB/10 dB entsteht ein maximales Unsicherheitsintervall 0,01 dB für die 3dB Bandbreite bzw. 0,04 dB für die 60 dB Bandbreite
E_f	Die Filtersteilheit bildet auftretende Pegelintervalle auf die Frequenzachse ab. Die Empfindlichkeit E_f ergibt sich mit der gemessenen Steilheit S_F der Selektionsfilter ² zu
	$E_f = \frac{S_F - 1}{57 \text{ dB}} \cdot 100 \frac{\%}{\text{dB}}$
	Bei typischen Werten von S_F von 5:1 oder steiler ergeben sich Werte für E_f besser als 7% pro dB
$K_{Res,f}$	Die Ablesung bei der Messung erfolgt i.d.R. nicht genauer als 4 Stellen, wodurch sich im schlechtesten Fall eine Abweichungsintervall von 0,1% ergibt
$K_{Res,dB}$	Die Ablesung der Unterschiedsmessung der 0 dB und Bandbreitenpunkte erfolgt i.d.R. nicht genauer 0,01 dB
K_{noise}	Der Unsicherheitsanteil durch Signalrauschen ergibt sich durch den Signal zu Rauschabstand zu maximal 0,003 dB bei einem SNR von 70 dB bzw. 0,15 dB bei einem Rauschabstand von 15 dB

² Verhältnis zwischen 60 dB und 3 dB Bandbreite = Formfaktor

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	15

XIII.5.8.1.2 Beispiel und tabellarische Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz

Kalibriert wird die 100 Hz Filterbandbreite eines Spektrumanalysators durch Verwendung der „Delta-Marker“ Funktion bezogen auf den Spitzenwert des Signals (Peak).

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $w_i(y)$
$BB_{gemessen}$	100,1 Hz					
K_f	1	$1 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	$\frac{1 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}}$	2	0,00 %
E_f	$7 \frac{\%}{dB}$					
K_{dB}	0 dB	0,03 dB	Rechteck	$\frac{0,03 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	$2E_f$	0,24 %
K_{noise}	0 dB	0,0032 dB	Rechteck	$\frac{0,0032 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	$2E_f$	0,02 %
$K_{Res,dB}$	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,01 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	$2E_f$	0,08 %
$K_{Res,f}$	1	0,1 %	Rechteck	$\frac{0,1 \text{ \%}}{\sqrt{3}}$	1	0,06 %
BB	100,1 Hz			$w(BB_{BW}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,26 %
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$W(BB_{BW}) = k \cdot u(\Delta L_{DUT})$		0,53 %

XIII.5.8.2 Steilheit der Selektionsfilter (Formfaktor)

Das Verfahren zur Kalibrierung der Steilheit der Selektionsfilter ist ebenfalls in VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.7 beschrieben. Der Messaufbau ist identisch zu Bild XIII.5.8.1.1. Der Kalibrierablauf ist ebenfalls nahezu identisch zur Filterbandbreitenmessung: Zusätzlich zur 3 dB Bandbreite Δf_{3dB} wird noch die 60 dB Bandbreite Δf_{60dB} benötigt, um das Verhältnis der beiden Werte zu bilden. Die Filtersteilheit S errechnet sich dann zu

$$S = \frac{\Delta f_{60dB}}{\Delta f_{3dB}}$$

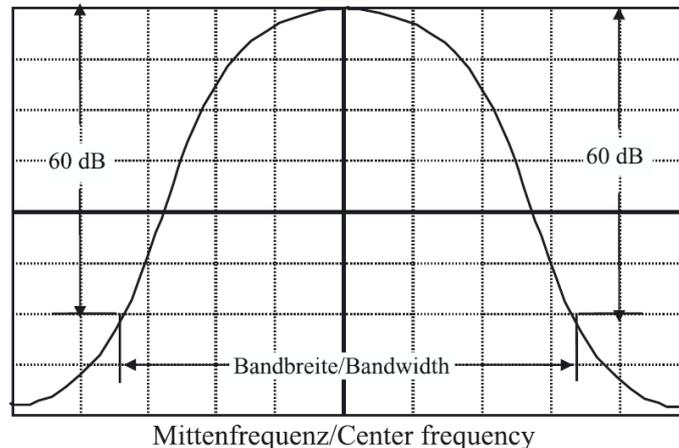


Bild XIII.5.8.2.1 Ablesung der 60 dB Bandbreite gemäß VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.7

Die Rückführung erfordert auch hier die vorangehende Kalibrierung des Messobjekts bezüglich Dämpfung und Frequenz, damit dieses dann als Normal für diese Messung verwendet werden kann.

Die Unsicherheit ergibt als Summe der Unsicherheiten der 3 dB- und 60 dB-Bandbreite BB_3 und BB_{60} . Dominierender Anteil bildet die Unsicherheit der Bestimmung der 60 dB-Bandbreite, die wesentlich durch den Signal zu Rauschabstand während der Messung beeinflusst wird.

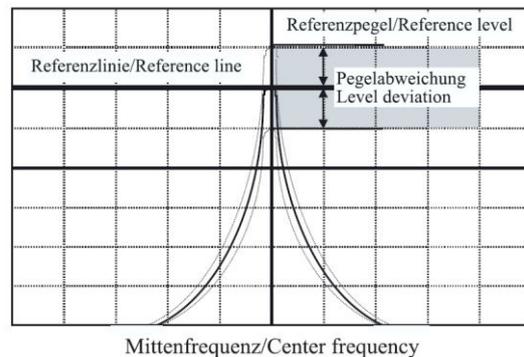
$$W(S) = \sqrt{W(BB_3)^2 + W(BB_{60})^2}$$

XIII.5.8.3 Umschaltabweichung der Selektionsfilter

Die Umschaltabweichung der Selektionsfilter von Spektrumanalysatoren oder Messempfängern gibt die maximale Veränderung des Messwertes bei Veränderung der Messbandbreite wieder. Sie wird gemäß VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.8 ermittelt. Der Messaufbau ist in Bild XIII.5.8.1.1 dargestellt:

Messbeispiel:

- Mittenfrequenz auf Bezugsfrequenz einstellen (z.B. 50 MHz)
- Eingangsabschwächer auf 10 dB einstellen
- Referenzpegel (oberste Skalierungslinie) auf Bezugspegel einstellen (z.B. Pegel des Kalibriergenerators)
- Skalierung auf 1 dB/Div einstellen
- entsprechende Span/Div einstellen
- größte Bandbreite einstellen
- Ablenkzeit passend zur gewählten Bandbreite einstellen
- Am Synthesizer gleiche Frequenz wie Mittenfrequenz einstellen
- Referenzlinie (zwei Div unter Maximalpegel) einstellen.
- Bandbreiten schrittweise herunterschalten (gleichzeitig Span/Div evtl. gemäß Herstellerangabe verringern)
- Pegelabweichung bei allen Bandbreiteneinstellungen ermitteln.



Kalibrierung der Umschaltabweichung der Filter von Spektrumanalysatoren (VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.8)

Die lückenlose Rückführung wird bei externer Frequenzsynchronisation durch die vorangegangene Linearitätskalibrierung des Messobjektes selbst garantiert (Messgröße Dämpfung), da der Messwert direkt am Kalibriergegenstand abgelesen wird.

XIII.5.8.3.1 Modellgleichung

$$\Delta_{RBW-Switching} = \Delta_{gemessen} + \delta_{Gen,Stab} + \delta_{Res} + \delta_{Lin}$$

mit

- $\Delta_{RBW-Switching}$ gesuchte Umschaltabweichung des Selektionsfilters bezogen auf Ausgangsstellung
- $\Delta_{gemessen}$ gemessene/ ermittelte Umschaltabweichung
- $\delta_{Gen,Stab}$ Korrektion aufgrund der Generatorinstabilität
- δ_{Res} Korrektion durch die begrenzte Pegelauflosungsauflosung bei der Messung
- δ_{Lin} Korrektion durch die Nichtlinearität der Anzeige

$\delta_{Gen,Stab}$ Die Instabilität der Signalquelle leistet i.d.R. kaum messbare Anteile. Sie wird dennoch mit einem maximalen Einfluss von 0,005 dB berücksichtigt

δ_{Res} Die begrenzte Auflösung und Wiederholbarkeit des Kalibriergegenstandes, z.B. des Deltamarkers, wird für typische Messobjekte besser als 0,01 dB angenommen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	17

δ_{Lin}

Die Linearitätsabweichung des Kalibriergegenstand wird gemessen und geht in das Messergebnis mit ein. Für die Berechnung der Messunsicherheit werden maximale Linearitätskorrekturen von 0,015 dB bei typischerweise kleinen gemessenen Abweichungen <1 dB angenommen.

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
$\Delta_{gemessen}$	0,00 dB					
$\delta_{Gen,Stab}$	0 dB	0,005 dB	Rechteck	$\frac{0,005 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0029 dB
δ_{Res}	0 dB	0,01 dB	Rechteck	$\frac{0,01 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0058 dB
δ_{Lin}	0 dB	0,015 dB	Rechteck	$\frac{0,015 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0087 dB
Δ_{RBW-} <i>Switching</i>	0,00 dB		$u(L_{DUT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,011 dB	
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$U(L_{DUT}) = k \cdot u(\Delta L_{DUT})$		0,02 dB

XIII.5.8.4 Ergebnisse

Messgröße, Kalibriergegenstand	Messbereich, Messspanne	Messbedingungen, Verfahren	genäherte Messunsicherheit	Bemerkungen
Bandbreite Filter	1 Hz bis 10 MHz	VDI/ VDE/ DGQ/ DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.6 bis 3.2.8	0,5 %	Signal zu Rausch- Abstand / $SNR \geq 70$ dB
Formfaktor	>1:1 bis 5:1		3 %	Signal zu Rausch- Abstand / $SNR \geq 35$ dB
	>5:1 bis 10:1		6 %	
	>10:1 bis 20:1		12 %	
Umschaltabweichung		0,02 dB		

XIII.5.9 Rauschanzeige und Nullpunktabweichung von HF-Empfängern

Die Kalibrierung der Rauschanzeige von HF-Empfängern³ wird gemäß VDI/VDE/DGQ/DKD 2622-11:2003 Abs. 3.2.14 durchgeführt. Der Empfänger (DUT) kann dabei ein Spektrumanalysator oder ein Messempfänger sein. Da der Empfänger nach seiner Kalibrierung selbst Dämpfungs- (Linearitäts-) und Leistungsnormal gemäß Kapitel XIII.5.6 darstellt, wird die Messung rückführbar auf die dort beschriebenen Verfahren. Der Bezug zur Absolutleistung ergibt sich nach Kalibrierung von Referenzpegel, Linearität und Frequenzgang (s.a. Kapitel XIII.2). Das eigentliche Normal stellt dabei der Lastabschluss (50 Ω) dar, der eine Leistung von 0 mW erzeugt, die nur durch eine thermischen (Rausch-)Leistung überlagert wird (siehe XIII.1.8.1).

Der Ablauf der Messung kann dabei folgendermaßen zusammengefasst werden (siehe dazu auch DKD 2622-Blatt14):

1. Am Messobjekt, z.B. Spektrumanalysator, den Eingangsabschwächer auf 0 dB einstellen
2. Eingang des Empfängers mit 50 Ω Last abschließen
3. Referenzpegel möglichst auf minimalen Wert einstellen (ZF-Verstärker maximal)

³ englisch DANL = Displayed Average Noise Level

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	18

4. Skalierung auf 10 dB/Div oder kleiner einstellen
5. Bandbreite (B) möglichst klein (z.B. 10 Hz) oder gemäß der Herstellerangabe einstellen
6. Videobandbreite zu $B/10$ einstellen
7. Sofern möglich oder nötig am Messobjekt die Normierung auf 1 Hz Bandbreite aktivieren
8. Mittelwertbildung aktivieren (z.B. 16 Sweeps) und Messwert $P_{gemessen}$ ermitteln
9. ggf. aus der Markerablesung P_{Marker} Normierung auf 1 Hz Bandbreite ähnlich XIII.1.8.1 durchführen mit

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

$$P_{gemessen} = P_{Marker} - b$$



Bild XIII.5.9.1 Kalibrierung des Eigenrauschens eines Spektrumanalysators mit 50 Ohm Lastabschluss am HF-Eingang

Dabei kann gezeigt werden, dass das Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung des Übersprechens von Mehrtorgeräten (z.B. einem 2-Port Netzwerkanalysator, angegeben in dB) identische oder mindestens kleinere Unsicherheiten erzeugt, da der Bezug auf Absolutleistung keine Rolle spielt. Dabei wird jedes Tor (jeder Port) dieser Geräte mit 50 Ω Last abgeschlossen und der relative Empfangspegel des zweiten Ports zur Sendeleistung des ersten Ports in dB und umgekehrt aufgezeichnet.

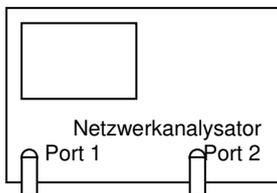


Bild XIII.5.9.2 Kalibrierung des Übersprechens eines Netzwerkanalysators mit 50 Ohm 2 Lastabschlüssen an beiden Ports

Das unten gezeigte Modell gilt für die Rauschleistungsanzeige größer als -170 dBm[Hz⁴].

XIII.5.9.1 Modellgleichung

$$P_{DANL} = P_{angezeigt} + \delta P_{sdev} + \delta P_{Res}$$

mit

P_{DANL}	gesuchte Rauschleistungsanzeige
$P_{angezeigt}$	gemessene/ ermittelte Rauschleistungsanzeige bei Mittelwertbildung
δP_{sdev}	Streuung der Messwertwerte um den Mittelwert
δP_{Res}	Auflösung der Messung

Die Einflussgrößen stellen im Wesentlichen gemessene Werte dar. Für die Berechnung und Angabe einer Messunsicherheit werden jedoch typische Werte eines „guten“ Messobjektes verwendet.

δP_{sdev} Die Streuung der Messwerte um den Mittelwert kann aus der Beobachtung berechnet werden. Werte kleiner 0,0,1 dB sind erreichbar.

⁴ Die thermische Rauschleistung bei maximalen Messraumtemperaturen von 25 °C ergibt sich zu -173,9 dBm[Hz]. Kleinere Anzeigewerte sind Grundsätzlich denkbar, ein Angabe ist messtechnisch aber nicht sinnvoll

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	19

δP_{Res} Die Auflösung bei der Erfassung der Werte wird i.d.R. nicht besser als 1 dB angegeben.

XIII.5.9.2 Tabellarische Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
$P_{angezeigt}$	-140 dBm					
δP_{sdev}	0 dB	0,1 dB	Normal	0,1 dB	1	0,1000 dB
δP_{Res}	0 dB	1 dB	Rechteck	$\frac{1 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,58 dB
P_{DANL}	-140 dBm			$u(P_{noise}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,58 dB
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$U(P_{DANL}) = k \cdot u(P_{DANL})$		1,2 dB

XIII.5.9.3 Nullpunktabweichung

Es kann zweckmäßig sein mit dem o.g. Verfahren (Lastabschluss am Empfängereingang) lediglich die Nullpunktabweichung eines Messgerätes zu bestimmen. Dieser Wert wird beispielsweise bei der Messunsicherheitsrechnung für HF-Leistungsmessgeräte benötigt. Wie in XIII.1.8 beschrieben ist die durch die Umgebungsbedingungen erzeugte (Rausch-)Leistung abhängig von der Messraumtemperatur und der Messbandbreite B des Empfängers. Somit ergibt sich der kleinste Darstellbare Wert, d.h. die kleinste erzeugbare Leistung P_{min} zu

$$P_{min} = 4,1 \cdot 10^{-21} \text{ W} \cdot B$$

Im Beispiel eines breitbandigen Empfängers wie einem 6 GHz-Leistungsmesskopf ergibt sich

$$P_{min} = 4,1 \cdot 10^{-21} \text{ W} \cdot 6 \text{ GHz} = 25 \text{ pW}$$

Mit der gesuchten Nullpunktabweichung P_{Offset} und dem Einfluss des kleinsten erzeugbaren Leistungswertes P_{min} der Modellgleichung bei Ableseung des Wertes $P_{Anzeige}$ am Messobjekt in der Modellgleichung

$$P_{Offset} = P_{Anzeige} + \delta P_{min}$$

stellt dieser Wert als u-verteiltens Unsicherheitsintervall gleichzeitig die erweiterte Messunsicherheit (k=2) für die Ermittlung der Nullpunktabweichung dar, der lediglich die vom Messobjekt abhängige Anzeigeschwankung überlagert ist und im Einzelfall als empirische Standardunsicherheit noch zu berücksichtigen ist (Mittelwertbildung). Die Rückführung erfolgt dabei ausschließlich durch die Darstellung der Messraumtemperatur. Impedanz und Anpassung spielen bei der Messung keine Rolle.

XIII.5.10 XL-Tabellen

Die zugrunde liegenden Rechentabellen in MS Excel (XL) sind den Dateipfaden des Intranets in der aktuellsten Fassung entnehmbar:

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XIII.5-Kalibrieren-von-HF-Daempfung.xlsx>

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	20



© 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.21	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.5 HF-Dämpfung	21