

## XIII.6 HF-Verstärkung

### XIII.6.1 Kalibrierverfahren mit HF-Leistungsmessköpfen

Ähnlich der Dämpfungskalibrierung können Verstärker ohne Gefahr der Zerstörung oder Überlastung von Messeingängen der VNAs bzw. der Verstärker selbst (Schwingen) an gut angepassten und linearen Leistungsmessköpfen 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.6.1 gegen die Leistung am Verstärkereingang: Dabei wird über einen symmetrischen Leistungsteiler ("Power Splitter" z.B. Weinschel 1870A, vgl. Abschnitt XIII.2.1.3) und über ein Zweikanal-Leistungsmessgerät wie R&S NRVD direkt die Verstärkung des Messobjektes gemessen und abgelesen, sofern eine zusätzliche Korrektur des Dämpfungsgliedes am Ausgang erfolgt.

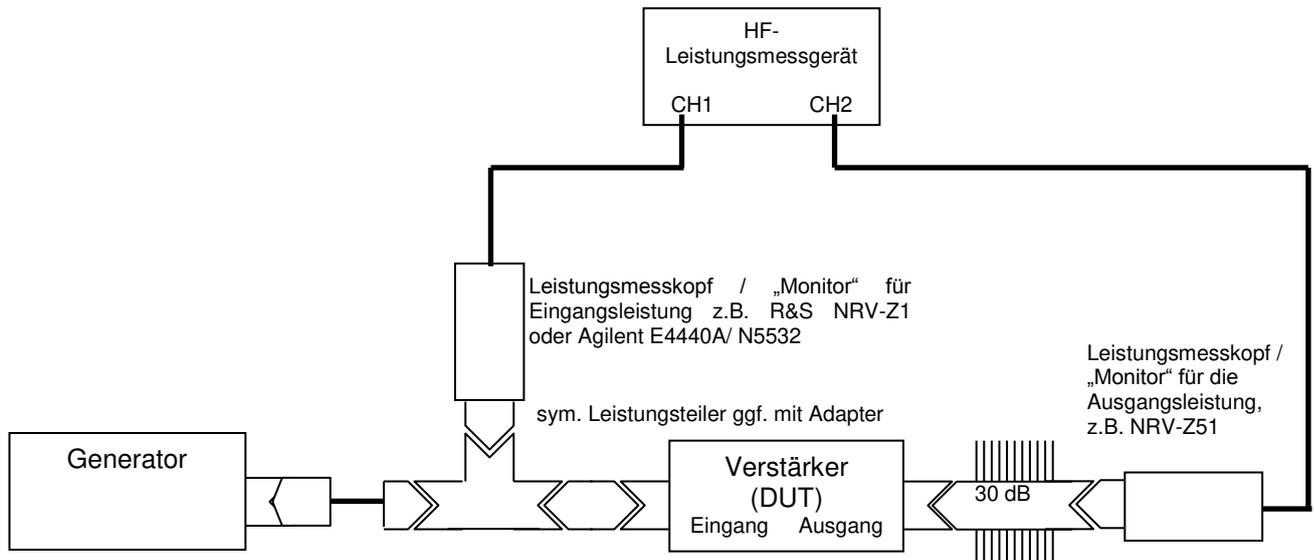


Bild XIII.6.1 Verstärkungskalibrierung über Absolutleistungsmessung an Eingang und an Ausgang

### XIII.6.2 Messunsicherheit

Die Modellgleichung zur Bestimmung des Wertes  $L_x$  des Messobjektes im  $50 \Omega$  System in dB lässt sich formulieren zu:

$$L_x = \Delta L + \Delta L_{Tracking} + \Delta L_{Att} \left[ + \Delta L_{Att,in} \right] + \delta L_{Adapter} + \delta P_{in} + \delta P_{out} + \delta L_{Att} - \Delta L_{MM}$$

mit

$\Delta L$	gemessene Verstärkung als Verhältnis der Ausgangs- zur Eingangsleistung
$L_x$	Anzeige bei Anschluss des Prüflings
$\Delta L_{Tracking}$	Korrektur durch den nicht idealen Gleichlauf des Leistungsteilers (Unsymmetrie)
$\Delta L_{Att}$	Korrektur des Dämpfungsgliedes am Ausgang
$\Delta L_{Att,in}$	optionale Korrektur eines Dämpfungsgliedes am Eingang
$\delta L_{Adapter}$	Korrektur der Dämpfung des oder der Adapter
$\delta P_{in}$	Abweichungskorrektur durch die Absolutleistungsmessung am Eingang- bzw.
$\delta P_{out}$	am Ausgang (vgl. XIII.1)
$\delta L_{Att}$	Korrektur durch die Dämpfungs- bzw. Gleichlaufbestimmung der verwendeten Komponenten
$\Delta L_{MM}$	Korrektur bedingt durch Fehlanpassungen (Mismatch)

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.6	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.6 HF-Verstärkung	1

Messunsicherheitsbilanz

$\Delta L$  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).

$\Delta L_{Tracking}$  Der Gleichlauf des Leistungsteilers kann durch dessen Angaben aus dem Kalibrierschein oder durch eine Wiederholung der Messung mit vertauschten Seiten korrigiert werden. Erfolgt keine Korrektur (Schätzwert = 0), so geht die maximale Abweichung im Frequenzband als rechteckverteiltes Unsicherheitsintervall in die Messunsicherheitsbilanz ein. Sonst wird die Abweichung durch die endliche Unsicherheit der Dämpfungsmessung durch den Beitrag  $\delta L_{Att}$  berücksichtigt.

$\Delta L_{Att}$   
 $\Delta L_{Att,in}$  Die Dämpfung des verwendeten Abschwächers am Ausgang kann gemessen und mit den aus Kapitel XIII.5 bekannten Unsicherheiten korrigiert werden. Genauso ist es möglich ein weiteres Dämpfungsglied am Eingang Stelle zu verwenden um die Eingangsleistung weiter zu verringern und damit den messbaren Dynamikbereich zu erhöhen.

$\delta L_{Adapter}$   
 $\delta L_{Adapter,n}$  Zwischen Verstärkereingang und Leistungsteilerausgang kann die Verwendung eines Adapters nötig sein. Die Dämpfung des Adapters oder Dämpfungsgliedes kann durch Messung der Dämpfung (z.B. Rücken-an-Rücken-Verfahren) korrigiert werden. Da diese Methode zwar gute Werte liefert, jedoch nicht vor jeder Verstärker-Kalibrierung mit jedem Adapter durchgeführt wird, werden i.d.R. die Schätzwerte zu null gesetzt. Der Adaptereinfluss wird entweder mit den typischen, gemessenen oder den spezifizierten Adapterdämpfungen als u-verteilttes Unsicherheitsintervall berücksichtigt. Werden mehrer Adapter z.B. für den Übergang auf ein anderes Steckersystem benötigt ist dieser Einfluss genauso zu berücksichtigen.

$\delta P_{in}$   
 $\delta P_{out}$  Die Abweichungen der Leistungsmessungen ist durch deren Unsicherheit (k=2, normalverteilt) bestimmt (vgl. XIII.1)

$\delta L_{Att}$  Die Korrekturen der Dämpfungen für Gleichlauf, Abschwächer am Ausgang bzw. Eingang und ggf. Adapterkalibrierung sind durch die Unsicherheit der Dämpfungsmessungen beeinflusst. Im schlechtesten Fall ist dieser Anteil 2mal zu verrechnen (Wurzel der Quadratesumme).

$\Delta L_{MM}$  An den Ein- und Ausgängen des Messobjektes treten Abweichungen durch die Anpassung des Verstärkers auf. Diese können mit den Systemdaten der Last-(Dämpfungsglied) und Quelltoranpassung (Leistungsteiler) etwa beschrieben werden als

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

Die Reflexionsfaktoren  $S_{11}$  am Eingang des Messobjektes können gemessen werden, die am Ausgang müssen anhand typischer Werte oder der Herstellerangaben geschätzt werden. Der äquivalente Quellenreflexionsfaktor des Leistungsteilers wird am Netzwerkanalysator bestimmt (vgl. Abschnitt XIII.2.6 und [26]). Ohne Korrektur dieses Einflusses ergibt sich ein u-verteilttes Unsicherheitsintervall.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.6	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIII.6 HF-Verstärkung	2

**XIII.6.3 Beispiel und tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz**

Kalibrierung eines 50 dB Leistungsverstärkers an den Leistungsmessköpfen R&S NRV-Z1 und NRV-Z51 bei einer Frequenz von 1 GHz über ein bekanntes 30 dB Dämpfungsglied am Ausgang. Der Reflexionsfaktor des Eingangs des Messobjektes wurden zusammen mit dessen Unsicherheit der Reflexionsmessung zu maximal  $S_{11}=0,08$  bestimmt. Der Ausgangsreflexionsfaktor wird aus den Angaben des Herstellers zu  $S_{22}=0,15$  geschätzt. Der Gleichlauf des Leistungsteilers am Eingang und die Adapterdämpfung wurden nicht korrigiert. Die typische Adapterdämpfung der verwendeten Serie liegt bei  $0,03 \text{ dB} \cdot \sqrt{f / \text{GHz}}$

$|\Gamma_Q|$  effektive Quelltoranpassung des Leistungsteilers =0,015  
 $|\Gamma_L|$  Lasttoranpassung des Abschwächers am Ausgang =0,060

Größe $X_i$	Schätzwert $x_i$	Halbbreite $a$	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität skoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
$\Delta L$	25,05 dB					
$\Delta L_{Tracking}$	0 dB	0,10 dB	Rechteck	$\frac{0,1 \text{ dB}}{\sqrt{3}}$	1	0,0577 dB
$\Delta L_{Att}$	30,3 dB	0,03 dB	Normal	$\frac{0,03 \text{ dB}}{2}$	1	0,0150 dB
$\delta L_{Adapter}$	0 dB	0,03 dB	u-verteilt	$\frac{0,03 \text{ dB}}{\sqrt{2}}$	1	0,0212 dB
$\delta P_{in}$	0 dB	0,09 dB	Normal	$\frac{0,09 \text{ dB}}{2}$	1	0,0450 dB
$\delta P_{out}$	0 dB	0,053 dB	Normal	$\frac{0,053 \text{ dB}}{2}$	1	0,0265 dB
$\delta L_{Att}$	0 dB	0,042 dB	Normal	$\frac{0,042 \text{ dB}}{2}$	1	0,0210 dB
$\Delta L_{MM}$	0 dB	0,096 dB	u-verteilt	$\frac{0,096 \text{ dB}}{\sqrt{2}}$	1	0,0680 dB
$L_x$	55,35 dB			$u(L_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$		0,109 dB
	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$U(L_x) = k \cdot u(L_x)$		0,22 dB

### XIII.6.4 Zusammenfassung der Einflussgrößen

#### XIII.6.4.1 Steckersystem „N“

Einflussgröße	Bereich	Bedingung	Schätzwert	Halbbreite	
Gleichlauf $\Delta L_{Tracking}$		DC bis 18 GHz	0,12 dB		
Dämpfungsglieder $\Delta L_{Att}$	3 dB bis 30 dB	DC bis 10 GHz	$\Delta L_{Att}$	0,03 dB	
		>10 GHz bis 18 GHz		0,04 dB	
Adapter, N(m-m) $\delta L_{Adapter}$		DC bis 18 GHz	0 dB	$0,03 \text{ dB} \cdot \sqrt{f / \text{GHz}}$	
Eingangsleistung $\delta P_{in}$	-40 dBm bis -7 dBm	10 MHz bis 50 MHz	0 dB	0,073 dB	
		>50 MHz bis 4 GHz		0,089 dB	
		>4 GHz bis 18 GHz		0,13 dB	
Ausgangsleistung $\delta P_{out}$	-13 dBm bis 19 dBm	DC bis 50 MHz	0 dB	0,040 dB	
		>50 MHz bis 4 GHz		0,053 dB	
		>4 GHz bis 12 GHz		0,069 dB	
		>12 GHz bis 18 GHz		0,091 dB	
Dämpfungsbestimmung $\delta L_{Att}$		DC bis 10 GHz	0 dB	0,042 dB	
		>10 GHz bis 18 GHz		0,057 dB	
Anpassung Splitter $ \Gamma_c $		DC bis 2 GHz	0,024		
		>2 GHz bis 4 GHz			0,034
		>4 GHz bis 18 GHz			0,070
Anpassung Dämpfungsglied $ \Gamma_L $		DC bis 100 MHz	0,010		
		>100 MHz bis 2 GHz			0,060
		>2 GHz bis 4 GHz			0,060
		>4 GHz bis 18 GHz			0,080
Anpassung Verstärker (DUT) $ S_{11} $		DC bis 100 MHz	0,050		
		>100 MHz bis 4 GHz			0,100
		>4 GHz bis 18 GHz			0,200
		$ S_{22} $			DC bis 100 MHz
		>100 MHz bis 4 GHz	0,150		
		>4 GHz bis 18 GHz	0,200		
Fehlanpassung $\Delta L_{MM}$		DC bis 100 MHz	0 dB	0,011 dB	
		>100 MHz bis 2 GHz		0,079 dB	
		>2 GHz bis 4 GHz		0,089 dB	
		>4 GHz bis 12 GHz		0,25 dB	
		>12 GHz bis 18 GHz		0,28 dB	

#### XIII.6.4.2 Steckersystem 2,92 mm

Einflussgröße	Bereich	Bedingung	Schätzwert	Halbbreite		
Gleichlauf $\Delta L_{Tracking}$		DC bis 40 GHz	0,1 dB			
Dämpfungsglieder $\Delta L_{Att}$	3 dB bis 30 dB	DC bis 26,5 GHz	$\Delta L_{Att}$	0,05 dB		
		>26,5 GHz bis 40 GHz		0,1 dB		
Adapter $\delta L_{Adapter}$		DC bis 40 GHz	0 dB	$0,03 \text{ dB} \cdot \sqrt{f / \text{GHz}}$		
Eingangsleistung $\delta P_{in}$	-40 dBm bis -10 dBm	10 MHz bis 4 GHz	0 dB	0,10 dB		
		>4 GHz bis 26,5 GHz		0,17 dB		
		>26,5 GHz bis 40 GHz		0,2 dB		
Ausgangsleistung $\delta P_{out}$	-13 dBm bis 19 dBm	DC bis 4 GHz	0 dB	0,10 dB		
		>4 GHz bis 26,5 GHz		0,15 dB		
		>26,5 GHz bis 40 GHz		0,20 dB		
Dämpfungsbestimmung $\delta L_{Att}$		DC bis 26,5 GHz	0 dB	0,05 dB		
		>26,5 GHz bis 40 GHz		0,1 dB		
Anpassung Splitter $ \Gamma_c $		DC bis 4 GHz	0,030			
		>2 GHz bis 26,5 GHz			0,070	
		>26,5 GHz bis 40 GHz			0,100	
Anpassung Dämpfungsglied $ \Gamma_L $		DC bis 100 MHz	0,010			
		>100 MHz bis 4 GHz			0,060	
		>4 GHz bis 40 GHz			0,080	
		$ S_{11} $			DC bis 100 MHz	0,050
Anpassung Verstärker (DUT) $ S_{11} $		>2 GHz bis 4 GHz	0,100			
		>4 GHz bis 40 GHz			0,200	
		$ S_{22} $			DC bis 100 MHz	0,100
					>100 MHz bis 4 GHz	0,150
		>4 GHz bis 26,5 GHz	0,200			
		>26,5 GHz bis 40 GHz	0,300			
Fehlanpassung $\Delta L_{MM}$		DC bis 100 MHz	0 dB	0,015 dB		
		>100 MHz bis 4 GHz		0,078 dB		
		>4 GHz bis 26,5 GHz		0,13 dB		
		>26,5 GHz bis 40 GHz		0,31 dB		

**XIII.6.4.3 BNC-Konnektor**

Für BNC-Konnektoren wird das Messsystem „N“ mit passenden Präzisionsadaptern verwendet. Sehr gute Adapter haben dabei kaum einen Einfluss auf die Reflexionswerte im Frequenzbereich bis 2 GHz, da Werte besser  $|Γ_{Adapter}| < 0,015$  erreicht werden können. Der Dämpfungsbelag lässt sich durch ein Intervall  $a_{Adapter}$  im Anteil  $δL_{Adapter2}$  berücksichtigen. Die typische Adapterdämpfung der verwendeten Serien liegt bei  $a_{Adapter} ≤ 0,04 dB · √f / GHz$

Die Berechnung zeigt, dass die Gesamtunsicherheit auch bei zusätzlicher Adaption nur unwesentlich verschlechtert wird.

**XIII.6.5 Ergebnisse**

Siehe auch XL-Tabelle

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XIII.6-Kalibrieren-von-HF-Verstaerkung.XLS>

Messgröße, Kalibriergegenstand	Messbereich, Messspanne	Messbedingungen, Verfahren	genäherte Messunsicherheit	Bemerkungen
HF-Verstärkung Verstärker  N-Konnektor und BNC-Konnektor, 50 Ω, andere Konnektoren erhöhen die Messunsicherheit	0 dB bis 70 dB	DC bis 100 MHz	0,19 dB	BNC Konnektor bis max. 2 GHz
		>100 MHz bis 2 GHz	0,26 dB	
		>2 GHz bis 4 GHz	0,3 dB	
		>4 GHz bis 18 GHz	0,5 dB	
2,92 mm Konnektor, 50 Ω,	0 dB bis 70 dB	DC bis 100 MHz	0,21 dB	
		>100 MHz bis 4 GHz	0,3 dB	
		>4 GHz bis 26,5 GHz	0,6 dB	
		>26,5 GHz bis 40 GHz	0,7 dB	

**XIII.6.7 Variante zur Mischerkalibrierung**

Im Aufbau wie in Bild XIII.6.7 gezeigt (ähnlich zu XIII.6.1) lassen sich Aufwärts- oder Abwärtsmischer mit zwei Leistungsmessköpfen zum "Monitoring" der Eingangsleistung  $P_{in}(f_{in})$  und Ausgangsleistung  $P_{out}(f_{out})$  (mit den zugehörigen Frequenzen  $f_{in}$  und  $f_{out}$ ) kalibrieren. Wird als Ergebnis die Mischerabweichung  $ΔP_{up/down}$  als

$$ΔP_{up/down} = P_{out}(f_{out}) - P_{in}(f_{in})$$

bestimmt so lässt sich aus den erweiterten Unsicherheiten der Einzelergebnisse (bei Berücksichtigung von Übergängen oder Adaptern) die Gesamtunsicherheit dieses Verfahrens einfach darstellen zu:

$$U(ΔP_{up/down}) = \sqrt{U(P_{out}(f_{out}))^2 + U(P_{in}(f_{in}))^2}$$

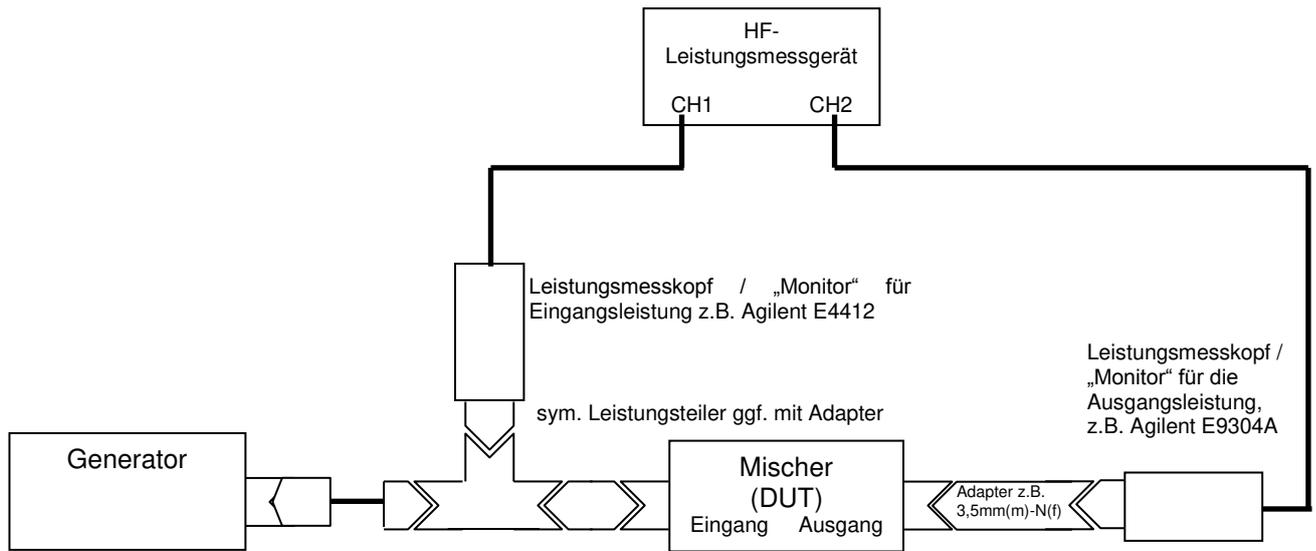


Bild XIII.6.7 Verstärkungskalibrierung über Absolutleistungsmessung an Eingang und an Ausgang

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



© 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.

<b>Ausgabe:</b>	<b>erstellt</b>	<b>geprüft/ genehmigt</b>	<b>Kapitel</b>	<b>Seite</b>
DMS.6	von: PF am: s.DMS	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - <b>XIII.6 HF-Verstärkung</b>	7