



Produkte: R&S®FSMR, R&S®NRP-Z27/37, R&S®NRP-Z51/Z55

Messunsicherheiten bei HF Pegelmessungen mit dem Messempfänger R&S® FSMR

Application Note

Die Messunsicherheiten, die beim Kalibrieren von HF Pegeln mit dem Measuring Receiver R&S® FSMR auftreten, werden hier beschrieben und quantifiziert. Verschiedene Excel® Arbeitsblätter sind beigefügt. Sie dienen zur einfachen Unsicherheitsberechnung für verschiedene Konfigurationen.



Contents

1	Überblick	3
2	Messprinzip des Messempfängers FSMR	3
	Analogteil	3
	Digitale Messwertverarbeitung	6
	Messverfahren mit Detector Narrow	8
3	Bezugsmessung mit Power Sensor für absolute Pegelmessgenauigkeit 10	
4	Ursachen der Messunsicherheit bei RF-Pegelmessungen mit dem FSMR	12
5	Unsicherheitsberechnungen für verschiedene Konfigurationen.....	14
	Absolute Leistungsmessung mit dem Power Sensor	14
	Einflüsse der Fehlanpassung.....	15
	Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit.....	17
	So verwenden Sie die Excel-Arbeitsblätter	17
	Relative Leistungsmessung mit dem FSMR	19
	Reduktion der Messunsicherheit aufgrund der VSWR	22
	Absolute RF-Leistungsmessung bei kleinen Pegeln.....	24
	Messung mit dem Power Sensor Modul R&S NRP-Z27 /-Z37	28
	Fazit:	29
	Vermeiden von Messunsicherheiten aufgrund des Generatorstörhubs und Frequenzdrift	30
6	Begriffserklärungen und Glossar	31
7	Literatur	35
8	Zusätzliche Informationen	35
9	Bestellinformationen.....	36

1 Überblick

Der R&S®FSMR ist eine Komplettlösung zur Kalibrierung von Signalgeneratoren und Dämpfungsgliedern. Der Kalibriermessempfänger kombiniert Pegelkalibrator, Modulations- und Audioanalysator, Leistungsmesser und Spektrumanalysator in einem Gerät. Er eignet sich wegen seiner hohen Pegellinearität und des breiten Frequenzbereichs von 20 Hz bis maximal 50 GHz (abhängig vom der Gerätemodell) ideal für Messaufgaben in Kalibrier- und Messlaboren. Diese Application Note befasst sich mit der besonderen Thematik der Pegelkalibrierung von Signalgeneratoren. Als Pegelkalibrator erreicht der R&S®FSMR einen Linearitätswert von 0,01 dB + 0,005 dB/10 dB. Der Messbereich erstreckt sich von +30 dBm bis -130 dBm.

Trotz der ausgezeichneten Werte des R&S®FSMR unterliegt die Pegelkalibrierung von Signalgeneratoren, wie jede Messung, vielen verschiedenen Unsicherheitseinflüssen, die sich auf die Qualität des Ergebnisses auswirken. Als Unsicherheitsquellen treten beispielsweise Fehlanpassungen, Linearitätsfehler, Rauscheinflüsse oder Temperatureffekte auf. Um eine Abschätzung der Messunsicherheit zu erhalten, muss man alle Unsicherheitsquellen quantitativ erfassen und in geeigneter Weise zu einer Gesamtunsicherheit zusammenfassen.

Dabei soll diese Application Note helfen. Sie liefert Erläuterungen und Hilfestellungen zur Bestimmung und Minimierung der Messunsicherheit bei der Pegelkalibrierung von Signalgeneratoren mit dem R&S®FSMR. Verschiedene Excel-Sheets stehen per Download zur Verfügung. Sie übernehmen die Berechnungen und erleichtern damit die Quantifizierung der Messunsicherheit.

Der Measuring Receiver R&S®FSMR wird nachfolgend mit FSMR abgekürzt.

2 Messprinzip des Messempfängers FSMR

Analogteil

Der R&S FSMR ist ein dreifach-umsetzender Überlagerungsempfänger für den Frequenzbereich 20 Hz bis 3,6 GHz (R&S FSMR3). Den Geräten, die die Frequenzbereiche 3,6 GHz bis 26,5 GHz (R&S FSMR26) bzw. 3,6 GHz bis 50 GHz (R&S FSMR50) abdecken, liegt für Frequenzen > 3,6 GHz ein zweifach umsetzendes Überlagerungsprinzip zugrunde.

Die im analogen Signalzweig verwendeten Mischer und Verstärker sind äußerst aussteuerungsfest und zugleich rauscharm ausgelegt. Damit ist der FSMR in der Lage, trotz des extrem weiten Pegelbereichs von -130 dBm bis +30 dBm in lediglich drei Messbereichen bei gutem Signal-Rauschabstand (SNR) und ohne Kompressionseffekt zu messen.

Ein hochlinearer 14 Bit-A/D-Wandler tastet die 3. ZF (die 2. ZF für Frequenzen > 3,6 GHz) ab. Seine Linearität bleibt auch bei kleinsten Pegeln erhalten. Verantwortlich hierfür ist ein spezielles Large-Scale-Dithering des

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

A/D-Wandlers. Die Filterung zur Bandbegrenzung und die Umsetzung in das komplexe Basisband (IQ-Daten) erfolgen digital.

Die Qualität des A/D-Wandlers und die Unsicherheit der Kalibrierung sind nahezu ausschließlich für die Linearität des FSMR verantwortlich. Baugruppen und Komponenten, die Drift (YIG-Filter) oder nichtlineares Pegelverhalten (Quarzfilter) zeigen können, sind im Pegelmessbetrieb deaktiviert. Die aussteuerungsfesten analogen Stufen wie Mischer und ZF-Verstärker werden weit unterhalb der Aussteuerungsgrenzen betrieben, um auch kleinste Kompressionseffekte auszuschließen.

Die Messung des gesamten Pegelbereichs üblicher HF-Generatoren, der beispielsweise zwischen -130 dBm und +10 dBm liegt, erfordert die Umschaltung des eingebauten HF-Pegelteilers oder der ZF-Verstärkung. Der R&S FSMR eliminiert die daraus resultierenden möglichen Pegelmessunsicherheit durch eine Anschlusskalibrierung: Bei konstantem Pegel wird das Messergebnis nach der Umschaltung auf das Messergebnis vor der Umschaltung korrigiert. Die Anschlusskalibrierung erfolgt über den RECAL-Softkey. Ein entsprechender Hinweis (gelbe **RECAL** Anzeige) im Display weist den Anwender auf eine notwendige Anschlusskalibrierung hin.

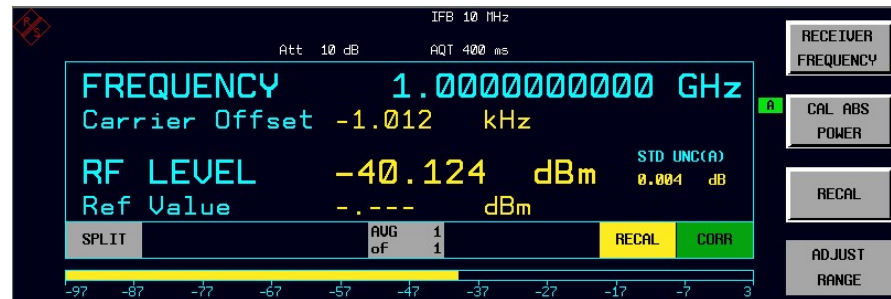


Abbildung 1: Ausschnitt aus dem FSMR-Display mit Aufforderung (**RECAL**) zur Rekalibrierung

Auch das Verlassen des zulässigen Pegelbereichs für eine Rekalibrierung zeigt der FSMR an. Auf dem Bildschirm erscheint der Hinweis **UNCORR**.



Abbildung 2: Ausschnitt aus dem FSMR-Display mit dem Warnhinweis **UNCORR**, dass der zulässige Bereich der Rekalibrierung verlassen wurde

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

Den nachfolgenden Grafiken und Tabellen kann man die Messbereichsgrenzen und die Re-Kalibrierbereiche des FSMR entnehmen. Bei Messung mit dem Sensor Modul NRB-Z27/37 verschieben sich Meß- und Re-Kalibrierbereiche aufgrund der Dämpfung des Moduls.

Messbereiche (power ranges):

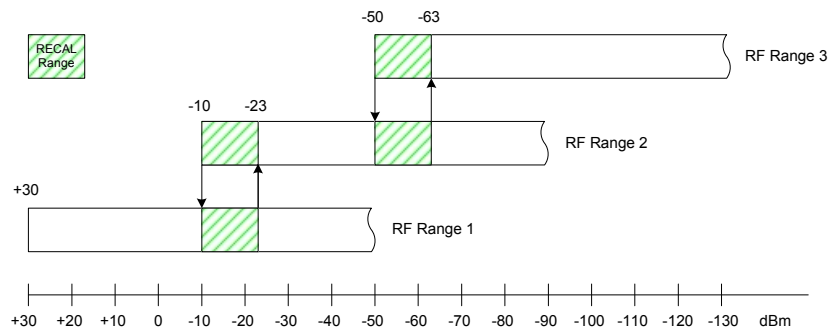


Abbildung 3: Grafische Darstellung der FSMR-Pegelmessbereiche

Range	RF ATT	REF LEVEL	PREAMP	Messbereich
RF Range 1	50 dB	30 dBm	Off	+30 bis -20 dBm
RF Range 2	10 dB	-10 dBm	Off	-10 bis -60 dBm
RF Range 3	0 dB *)	-50 dBm	On	-50 bis -130 dBm

Tabelle 1: Pegelmessbereiche des FSMR

*) im Gerätegrundzustand, einstellbar ist 0 dB oder 10 dB

Bereiche für die Anschlußkalibrierung (Display-Anzeige RECAL):

Range 1 ↔ Range 2: -10 bis -23 dBm

Range 2 ↔ Range 3: -50 bis -63 dBm

Power Ranges mit Power Sensor Module NRP-Z27/-Z-37:

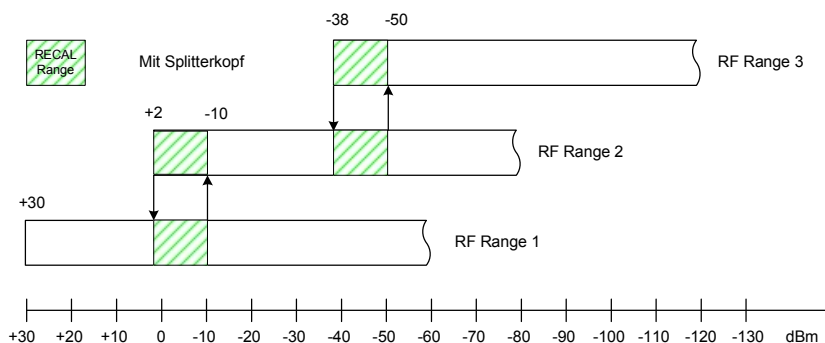


Abbildung 4: Grafische Darstellung der FSMR-Pegelmessbereiche mit Power Sensor Module NRP-Z27/-Z-37

Range	RF ATT	REF LEVEL	PREAMP	Messbereich
RF Range 1	50 dB	30 dBm	Off	+30 bis -10 dBm
RF Range 2	10 dB	0 dBm	Off	+2 bis -50 dBm
RF Range 3	0 dB *)	-40 dBm	On	-38 bis -120 dBm

Tabelle 2: FSMR-Pegelmessbereiche mit Power Sensor Module NRP-Z27/-Z-37

*) Gerätegrundzustand, einstellbar ist 0 dB oder 10 dB

Bereiche für die Anschlußkalibrierung (Display-Anzeige RECAL):

Range 1 ↔ Range 2: +2 bis -10 dBm

Range 2 ↔ Range 3: -38 bis -50 dBm

Digitale Messwertverarbeitung

Bestimmung des RF Pegels aus den Basisband I/Q Daten

Im Folgenden werden das Messverfahren sowie einige Begriffe der digitalen Messwertverarbeitung erklärt, die für das Verständnis der davon herrührenden Messunsicherheiten sowie eventueller Messprobleme von Bedeutung sind.

Messbandbreite (measuring bandwidth)

Die Messbandbreite ist gleich der eingestellten Demodulationsbandbreite (DEMODO BW). Signale, die sich innerhalb der Messbandbreite befinden, werden ohne Genauigkeitseinschränkungen erfasst. Im Grundzustand ist die Messbandbreite 12,5 kHz. Damit kann der FSMR innerhalb einer tolerierbaren Frequenzablage von $\pm 6,25$ kHz messen. Die Messbandbreite

(Softkey DEMOD BW) kann für spezielle Messaufgaben innerhalb eines weiten Bereichs von 100 Hz bis 10 MHz eingestellt werden z.B. um mit einer entsprechend großen Bandbreite sehr instabile Signal von Mikrowellen-Wobbelgeneratoren zu messen.

Detektorbandbreite (detection bandwidth)

Man kann zwischen zwei Detektorbandbreiten wählen, im Grundzustand ist Detektor Narrow aktiv. Alle folgenden Unsicherheitsberechnungen beziehen sich auf diesen Detektor.

Detector Wide

Berechnet wird der RMS Wert aus den I/Q Daten. Die Detektorbandbreite ist damit identisch mit der Messbandbreite (DEMOD BW).

Detector Narrow

Die Basisband-IQ Daten werden einer FFT unterzogen um den RF Pegel innerhalb des abgetasteten RF Spektrums zu berechnen. Die Detektorbandbreite und damit die **effektive Rauschbandbreite** wird durch die verwendete FFT Fensterfunktion und die Messzeit festgelegt. Damit wird die untere Messgrenze der RF Pegelmessung bestimmt. Um höchste Messgenauigkeit zu erreichen, wird im FSMR ein Flattop-Fenster verwendet. Die Rauschbandbreite des Fensters ist: $3,86/(\text{Messzeit})$ und damit im Grundzustand $3,86/(400 \text{ ms}) = 9,75 \text{ Hz}$.

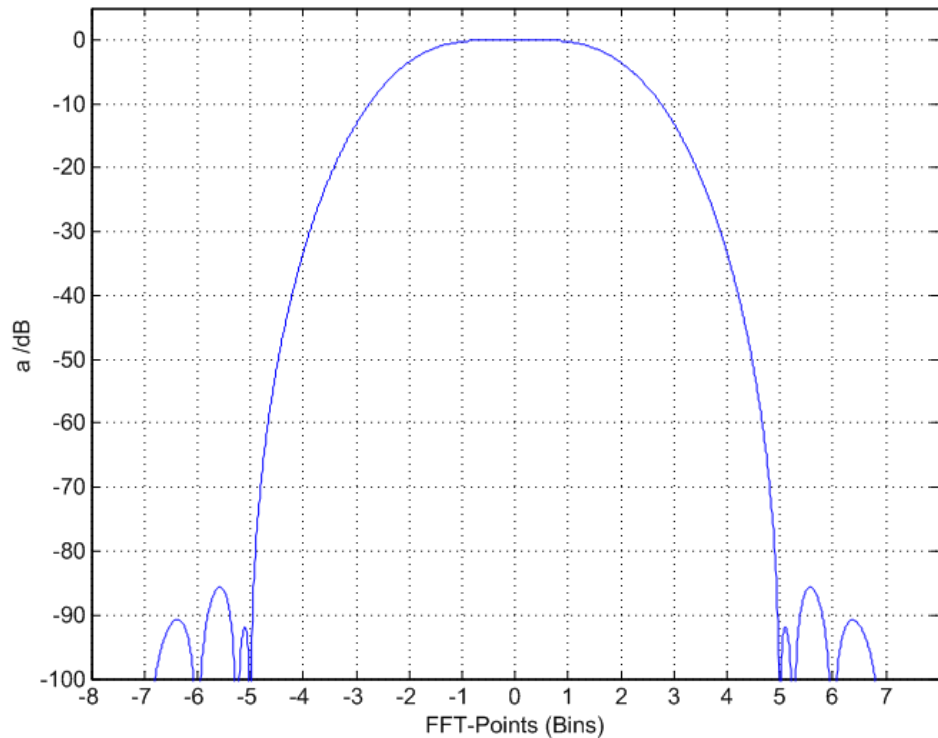


Abbildung 5: Flattop Fenster im Frequenzbereich. Die Rauschbandbreite beträgt $3,86/(\text{Messzeit}) = 3,86/400\text{ms} = 9,75$ Hz im Grundzustand.

Messverfahren mit Detector Narrow

Es wird automatisch das größte Signal innerhalb der Messbandbreite gemessen (peak search), solange der Signal-Rauschabstand (SNR) in der FFT mindestens 35 dB ist. Sinkt der Rauschabstand unter 35 dB, so wird die Frequenz des zuletzt gefundenen Signals beibehalten. Solange nach einstellen der Receiver Frequenz kein hinreichend großes Signal anliegt, um ein SNR von 35 dB zu erzielen, misst der FSMR genau auf der eingestellten Receiver Frequenz.

Zur SNR Berechnung wird die Leistung des größten gefundenen Signals und die innerhalb der Messbandbreite gemittelte und auf 1 FFT bin normierte Rauschleistung verwendet.

Damit bei kleinem SNR das Rauschen die Pegelanzeige des Detector Narrow nicht verfälscht, wird die Rauschleistung automatisch rechnerisch subtrahiert. Die Anzeige ist damit **rauschkorrigiert**, die statistischen Schwankungen treten symmetrisch zum Erwartungswert des Messpegels auf.

Aus dem gemessenen Signal-Rausch-Verhältnis sowie der Anzahl der Mittelungen n berechnet der FSMR die Standardunsicherheit der Messwertschwankungen nach folgender Formel und zeigt sie im Display an:

$$\text{STD UNC(A) / dB} = \frac{20}{\sqrt{n}} * \log \left(1 - 10^{-\frac{\text{SNR}}{20}} \right) \quad \text{Formel 1}$$

Der FSMR mittelt im Auto Average Mode abhängig vom Messpegel die Pegelmesswerte automatisch, um die Messunsicherheit aufgrund des Rauschens (STD UNC(A)) gering zu halten. Im Grundzustand wird die Abhängigkeit nach nachfolgender Tabelle eingestellt. Die Tabelle ist editierbar, um die Messungen an spezielle Erfordernisse angleichen zu können. So kann man eine geringere Messwertschwankung aufgrund des Rauschens erhalten, muss aber den Nachteil einer längeren Messzeit in Kauf nehmen (siehe dazu Formel 1).

AUTO AVERAGING CONFIGURATION TABLE	
Level Range	Number of Averages
< +30 dBm	1
< -70 dBm	2
< -80 dBm	4
< -90 dBm	8
< -100 dBm	16
< -110 dBm	32
< -120 dBm	64
< -130 dBm	128

Tabelle 3: Mittelungsfaktor bei Auto Averaging des FSMR

3 Bezugsmessung mit Power Sensor für absolute Pegelmessgenauigkeit

Die höchste Messgenauigkeit bei absolute Leistungsmessungen erreicht man mit einem Leistungsmesskopf nach dem thermoelektrischen Messprinzip wie dem NRP-Z51. Aufgrund der Unempfindlichkeit des thermoelektrischen Messprinzips setzt dies allerdings relativ große Pegel von typ. > -30 dBm voraus. Will man bis herab zu wesentlich kleineren Leistungen typ. < -70 dBm messen, so scheiden auch die empfindlicheren Dioden Leistungsmessköpfe aus und man ist auf die selektive Messmethode eines Messempfängers angewiesen. Der Messempfänger FSMR bietet eine höchstmögliche Linearität und einen extrem weiten Messbereich bis herab zu -130 dBm. Er erreicht aber nicht die absolute Messgenauigkeit eines thermoelektrischen Leistungsmesskopfes.

Mit Hilfe des thermoelektrischen Leistungsmesskopfes NRP-Z51, der an den zu messenden Generator angeschlossen wird, ist der FSMR in der Lage, bei einem entsprechenden Pegel (> -30 dBm) eine Bezugsmessung mit höchstmöglicher Genauigkeit durchzuführen (Funktion: *Cal Abs Power*). Schließt man nun bei gleichem Generatorpegel an Stelle des Leistungsmesskopfes den FSMR RF Eingang an den Generator an (Umschrauben erforderlich), so kann die FSMR Anzeige auf die vorher mit dem Messkopf erzielte Anzeige normiert werden. Aufgrund der extremen Linearität des FSMR und des weiten Messbereichs kann nun bis herab zu -130 dBm mit höchster Absolutgenauigkeit gemessen werden.

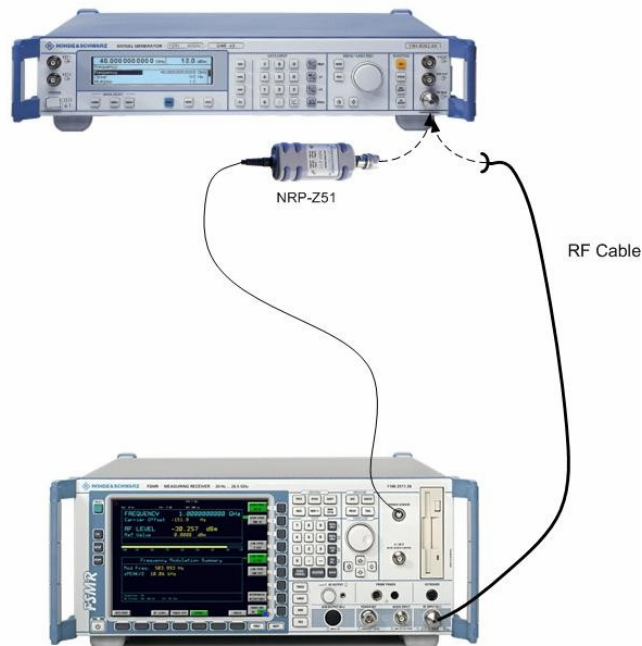


Abbildung 6: Normierung auf Powersensor NRP-Z51 für hohe Absolutgenauigkeit der FSMR Pegelmessung

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

Mit dem Power Sensor Modul NRP-Z27/37 verbindet man die Vorteile des thermoelektrischen Messprinzips mit der Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit eines präzisen Power Splitters für die Signalaufteilung zum FSMR. Geringes und konstantes VSWR sowie gute Isolation zum FSMR Eingang verringern entscheidend die durch das Quell VSWR des zu messenden Generators bedingten Messunsicherheiten.

Das lästige und zeitraubende Umschrauben vom Messkopf zum FSMR Eingang entfällt.

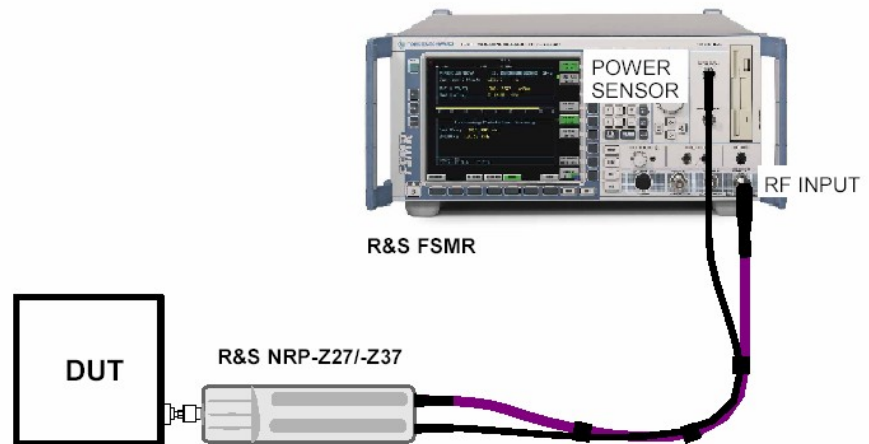
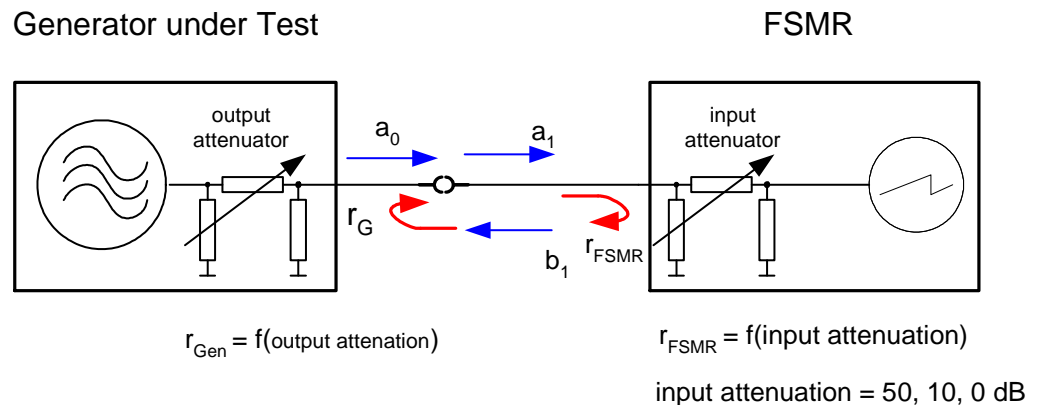


Abbildung 7: Messung mit Power Sensor Module NRP-Z27/37 für höchste Präzision

4 Ursachen der Messunsicherheit bei RF-Pegelmessungen mit dem FSMR

Bei RF-Pegelmessungen mit dem FSMR muss man folgende Fehlerquellen in Betracht ziehen:

- Bei absoluten Leistungsmessungen ist vor allem die **Messunsicherheit bei der Bezugsmessung** mit dem Power Sensor relevant. Hier sind entscheidende Faktoren die Sensorspezifikationen sowie die Fehlanpassung (VSWR) der Quelle (also des zu messenden Generators) und des Sensors. Power Sensoren weisen im Vergleich zu Messempfängern wie dem FSMR ein sehr kleines VSWR auf. Man erreicht deshalb eine sehr geringe Messunsicherheit.
- **Linearitätsfehler des FSMR:** Der Linearitätsfehler ist im Vergleich zu anderen Messunsicherheiten sehr klein.
- **Range-to-Range-Fehler des FSMR** (max. zwei Range-Umschaltungen): Auch der Range-to-Range Fehler des FSMR bei angepasster Quelle ist im Vergleich zu anderen Messunsicherheiten sehr klein.
- **Fehlanpassung (VSWR) von Quelle, Kabelverbindung und FSMR** (RF- Eingang) falls sich die Quell-VSWR verändert. Dies ist bei Messung von Generatoren im allgemeinen der Fall, da der Pegelteiler (Eichleitung) am Ausgang des Generators normalerweise abhängig von der Teilerstellung unterschiedliches VSWR aufweist.



a_0 : forward wave (matched case)

a_1 : resulting forward wave ($a_1 = a_0 + b_1 \cdot r_{Gen}$)

b_1 : resulting forward wave a_1 reflected by r_{FSMR} ($b_1 = a_1 \cdot r_{FSMR}$)

r_{Gen} : reflection coefficient of generator output

r_{FSMR} : reflection coefficient of FSMR input

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{1}{1 - r_{FSMR} \cdot r_{Gen}} \quad \text{Formel 2}$$

Abbildung 8: Testszenario bei Pegelmessung mit dem FSMR und nichtidealer Anpassung

Bedingt durch das im Vergleich zu einem Power Sensor relativ große VSWR des FSMR, macht sich der Einfluss auf die Gesamt- Messunsicherheit deutlich bemerkbar. Da der FSMR typischerweise die Stellung seines Pegelteilers und damit sein Eingangs-VSWR zweimalig ändert, kommt es in Verbindung mit dem sich ebenfalls ändernden Quell VSWR zur Addition der Messunsicherheiten aufgrund des VSWR. Abhilfen sind die Verwendung eines geeigneten, externen Dämpfungsglieds mit niedrigem VSWR vor den FSMR HF Eingang zu schalten oder besser die Verwendung des Power Sensor Moduls NRP-Z27/Z37. Der besondere Vorteil des Power Sensor Moduls NRP-Z27/37 ist das sowohl niedrige wie auch konstante VSWR mit nur geringer Abhängigkeit von den FSMR-Messbereichen aufgrund der hohen Isolation des Moduls. Dies verringert die normalerweise auftretenden zusätzlichen Messabweichungen aufgrund sich ändernder Lastimpedanz (VSWR des Sensors sowie des FSMR mit 50 dB, 10 dB oder 0 Eingangsdämpfung).

- Die **statistische Messunsicherheit (Typ A Messunsicherheit)**, verursacht durch das Signal-Rauschverhältnis SNR, hat bei kleineren Pegeln entscheidenden Einfluss. Er kann durch längere Messzeit und/oder einen höheren Mittelungsfaktor verringert werden. Dabei muss man allerdings eine längere Messzeit in Kauf nehmen.

5 Unsicherheitsberechnungen für verschiedene Konfigurationen

Absolute Leistungsmessung mit dem Power Sensor

Zu den Fehlerquellen des Sensors zählen

- Kalibrierunsicherheit
- Linearitätsunsicherheit
- Anzeigerauschen,
- Nullpunktoffset und –drift.
- Temperatureffekt

Als Beispiel dient im Folgenden eine Fehlerberechnung für den thermoelektrischen Power Sensor R&S NRP-Z51. Die Fehlerberechnungen für andere Sensoren folgen demselben Schema.

Die R&S-Leistungsmessköpfe wie der R&S NRP-Z51 werden in absoluten Leistungen kalibriert.

Der Gesamtmessbereich des Sensors NRP-Z51 beträgt -30 dBm bis +20 dBm. Das Datenblatt gibt die Kalibrierunsicherheit im Temperaturbereich 20 – 25°C (erweiterte Unsicherheit mit $k=2$) beim Kalibrierpegel 0 dBm an. Für andere Pegel müssen Linearitätsunsicherheit, Nullpunktoffset und –Drift, Anzeigerauschen und eventuell die Temperaturdrift zusätzlich zur Kalibrierunsicherheit berücksichtigt werden. Hinzu kommt die Unsicherheit die durch die Fehlanpassung von dem zu messenden Generator und dem Sensor entsteht.

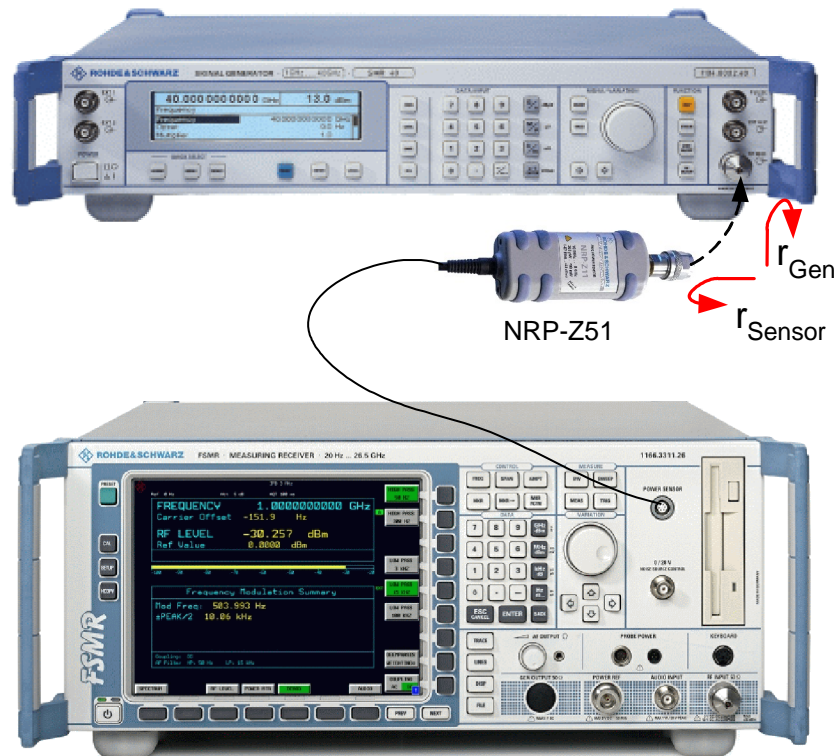


Abbildung 9: Absolute Leistungsmessung mit dem Power Sensor NRP-Z51

Einflüsse der Fehlanpassung

Ursache zusätzlicher und oft beträchtlicher Messunsicherheit sind die Fehlanpassung von Quelle (d.h. Generator) und Messkopf. Der Reflexionsfaktor von Leistungsmessköpfen wie dem R&S NRP-Z51 ist normalerweise im Vergleich zum Reflexionsfaktor eines typischen Signalgenerators sehr gering. Da aber das Produkt der Reflexionsfaktoren für die Messunsicherheit entscheidend ist, kann die Unsicherheit aufgrund der Fehlanpassung einen entscheidenden Beitrag zur Gesamtmessunsicherheit leisten. Zur Kalkulation der Unsicherheit dient die folgende Formel.

$$U_{MIS_Lim} / dB = 20 \log(1 + r_{Gen} \cdot r_{Sensor}) \quad \text{Formel 3}$$

Mit der Beziehung: $r = \frac{s-1}{s+1}$ Formel 4

erhält man:

$$U_{MIS_Lim} / dB = 20 \log \left(1 + \frac{s_{Gen} - 1}{s_{Gen} + 1} \cdot \frac{s_{Sensor} - 1}{s_{Sensor} + 1} \right) \quad \text{Formel 5}$$

mit

U_{MIS_Lim}	Unsicherheitsgrenzen aufgrund der Fehlanpassung in dB	
r	Betrag des Reflexionsfaktors	(0 to 1,0)
r_{Gen}	Betrag des Reflexionsfaktors des Generators	(0 to 1,0)
r_{Sensor}	Betrag des Reflexionsfaktors des Sensors	(0 to 1,0)
s	Voltage Standing Wave Ration (VSWR)	(1,0 to ∞)
s_{Gen}	VSWR des Generators	(1,0 to ∞)
s_{Sensor}	VSWR des Sensors	(1,0 to ∞)

Aufgrund ihrer U-förmigen Verteilung berechnet sich die Standardunsicherheit aufgrund der Fehlanpassung (U_{MIS_STB}) wie folgt:

$$U_{MIS_STB} / dB = 20 \log \left(1 + \frac{s_{Gen} - 1}{s_{Gen} + 1} \cdot \frac{s_{Sensor} - 1}{s_{Sensor} + 1} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{Formel 6}$$

Das nachfolgende Excel-Arbeitsblatt dient zur Berechnung der Unsicherheit der absoluten Leistungsmessung – für jeden Pegel und jede Frequenz innerhalb des angegebenen Messbereichs im Temperaturbereich 20 – 25°C. Die entsprechenden Werte für den Frequenzbereich 100 MHz bis 4 GHz (Spalte „Data“ im Excel-Arbeitsblatt) sind dem Datenblatt entnommen.

Für andere Pegel oder Frequenzen muß man die entsprechenden Werte aus dem Datenblatt in das Excel-Arbeitsblatt übertragen.

Zur Berechnung der Standardunsicherheit der einzelnen Komponenten berücksichtigt das Spreadsheet, welche Art von Verteilung die jeweiligen Einflußgrößen aufweisen und ob sie als Maximalwert, als erweiterte Unsicherheit (k=2) oder Standardunsicherheit spezifiziert sind. Siehe dazu auch Kapitel 6 Begriffserklärungen und Glossar. Bei angegebener erweiterter Unsicherheit (k=2) errechnet sich die Standardunsicherheit durch Division mit 2.

Bei angegebenem Maximalwert und Gleichverteilung der Messabweichung innerhalb der Grenzen wie es beispielsweise bei Messabweichung aufgrund der Temperatur der Fall ist, erhält man die Standardunsicherheit aus dem Maximalwert gemäß $(\text{Wert in dB}) / \sqrt{3}$.

Bei einer U-Verteilung, wie sie für die Messabweichungen aufgrund von Fehlanpassung gilt, erhält man die Standardunsicherheit gemäß $(\text{Wert in dB}) / \sqrt{2}$ siehe dazu Formel 6).

Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit

Zur Berechnung der **kombinierten Standardunsicherheit** der Leistungsmessung werden die einzelnen Standardunsicherheiten quadratisch aufsummiert. Die Wurzel des Summenwertes liefert dann die kombinierte Standardunsicherheit der Leistungsmessung.

Die erweiterte Unsicherheit erhält man durch Multiplikation mit dem Faktor $k=2$.

So verwenden Sie die Excel-Arbeitsblätter

Die Berechnung der Messunsicherheit ist mit den Excel-Arbeitsblättern ganz einfach. Man muß lediglich in der Spalte „Data“ den aktuell zu messenden Pegel und die der Messfrequenz entsprechenden Sensor-Daten in den gelb markierten Zellen eintragen (bei den folgenden Excel-Arbeitsblättern auch die entsprechenden Daten des FSMR). Diese entnehmen Sie dem dem jeweiligen Datenblatt des Sensors (bzw. des FSMR). Alle weiteren Berechnungen erfolgen automatisch.

Hat man alle Daten eingetragen, kann man in der grün hinterlegten Zeile am Tabellenende die Gesamtmessunsicherheit entnehmen. Im Arbeitsblatt sind als Beispiel die Werte für den Frequenzbereich 100 MHz – 4 GHz eingetragen. Der Messpegel ist zu 0 dBm angenommen. Die Erweiterte Messunsicherheit (Expanded Uncertainty, $k=2$) errechnet sich zu 0,183 dB im Grundzustand.

Will man beispielsweise die Messunsicherheit bei Messung eines Generators bei 10 GHz einem Pegel von -10 dBm ermitteln, so sind lediglich folgende Änderungen notwendig:

Testlevel: **-10 dBm**

Calibration Uncertainty: **0,076 dB** (aus Datenblatt NRP-Z51)

(Die VSWR-Spezifikation des zu messenden Generators wird unverändert zu 1.5 angenommen)

Die Erweiterte Messunsicherheit beträgt mit diesen geänderten Werten 0,190 dB.

Achtung! Es können ausschließlich die gelb markierten Zellen der Excel-Arbeitsblätter geändert werden. Alle anderen Bereiche sind geschützt, um ein versehentliches Überschreiben der Formeln zu verhindern. Der Schutz ist ohne Passwort und kann deshalb bei Bedarf aufgehoben werden. So kann man die der Berechnung zugrundeliegenden Formeln einsehen. Zur Aufhebungen des Schutzes unter *Extras/Schutz/Blatt schützen*: *“Arbeitsblatt und Inhalt gesperrter Zellen schützen“* deaktivieren

Geänderte Excel-Arbeitsblätter können Sie speichern. Beachten Sie aber, dass Sie damit das ursprüngliche Excel-Arbeitsblatt überschreiben. Es empfiehlt sich daher, eine Kopie mit den Originaldaten anzulegen.

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

	A	B	C	D	E	F
1	FSMR Absolute Power Measurement Uncertainty with NRP-Z51 100 MHz to 4 GHz (Powermeter Measurement):					
2		Distribution function	Data	Calcul. interim results	Unit	Standard Uncertainty in dB (1 σ).
3	Test Level in dBm		0	1,000E-03	W	
4	Specification of Display noise in nW (10,24s integration time)		30			
5	Display noise (1 s integration time)	gaussian (k=2)		9,60E-08	W	
6	Standard Uncertainty					0,000
8	Zero Offset in nW	gaussian (k=2)	50			
9	Standard Uncertainty					0,000
11	Zero Drift in nW	gaussian (k=2)	20			
12	Standard Uncertainty					0,000
14	Calibration uncertainty in dB (20 to 25 °C)	gaussian (k=2)	0,057			
15	Standard Uncertainty					0,029
17	Linearity Error in dB	gaussian (k=2)	0,02			
18	Standard Uncertainty					0,010
21	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor and Matched Source (in dB)					0,030
23	Uncertainty due to mismatch					
24	VSWR Sensor		1,15	0,0698	--	
25	VSWR Generator		1,5	0,2000	--	
26	Standard Uncertainty					0,086
27	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor in dB					0,091
28	Expanded Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor in dB (k=2)					0,183

Spreadsheet 1: Berechnung der Messunsicherheit für absolute Leistungsmessungen mit dem Messkopf R&S NRP-Z51

Relative Leistungsmessung mit dem FSMR

Man kann mit dem FSMR natürlich anstatt absoluter Leistungsmessungen auch relative Pegelmessungen zu einem Bezugspegel durchführen. Dabei entfällt die Messung mit dem Leistungssensor. Als typische Anwendung für relative Pegelmessung sei die Kalibrierung von Eichleitungen genannt.

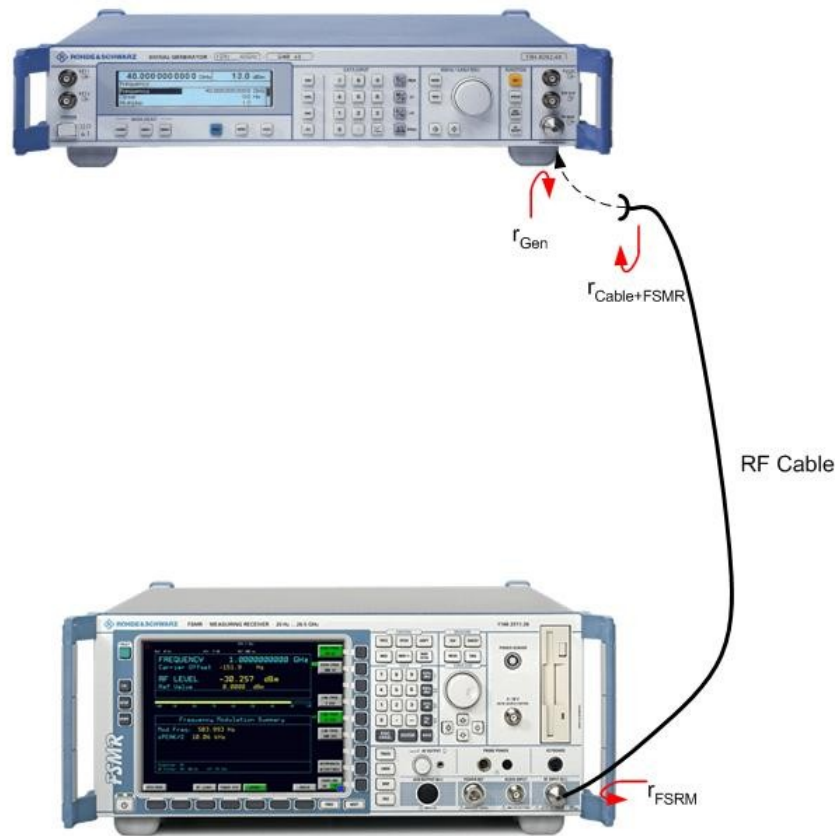


Abbildung 10: Messaufbau für relative Pegelmessung mit dem FSMR

Zur Berechnung der Messunsicherheit für diesen Fall dient das nachfolgende Spreadsheet.

Einzutragen sind:

- der **Bezugspegel** (Reference Level) und **Messpegel** (Level to measure),
- der entsprechende spezifizierte **Range-to-Range-Fehler** des FSMR (0.005 dB bis 22 GHz) je nach Frequenzbereich,
- **VSWR** von Generator (DUT) und FSMR (für 0 dB oder 50/10 dB attenuation) je nach Messfrequenz und –Pegel. Im Excel Arbeitsblatt werden die Einflüsse der FSMR Messbereichsumschaltung, genauer des Umschaltens des Eingangsdämpfungsglieds auf die Messunsicherheit auf-

grund der Fehlanpassung berücksichtigt. Es wird außerdem berücksichtigt, dass das 10 dB Dämpfungsglied direkt am FSMR Eingang liegt und immer eingeschaltet ist (Ausnahme: 0 dB Dämpfung). Die Anschlußkalibrierungen werden bei -20 dBm und bei -60 dBm angenommen. Der Einfluß des Messkabels wird in der Kalkulation der Einfachheit halber vernachlässigt, was bei Verwendung eines Präzisionskabels mit entsprechend geringem VSWR ($VSWR < 1,2$) zulässig ist. Sind mehrere voneinander unabhängige Einflusskomponenten auf die Messunsicherheit aufgrund der Fehlanpassung vorhanden, so wird die Wurzel aus der Quadratsumme der Einzelkomponenten gebildet (kombinierte Standardunsicherheit).

- der spezifizierte **DANL** (Displayed Average Noise Level) des FSMR normalisiert auf 10 Hz Auflösungsbreite (Resolution Bandwidth/RBW). Im Beispiel unten ist der typische DANL des FSMR 26 bei 4 GHz angegeben (-144 dBm).
- die eingestellte **Messzeit des FSMR** (im Grundzustand 400 ms),
- die **Mittelungsanzahl** (Average Number) des FSMR. Sie wird im Grundzustand automatisch dem Pegel entsprechend eingestellt. Aus DANL, Messzeit und Mittelungsanzahl wird die Standardabweichung der Typ A-Messunsicherheit berechnet und im Excel-Arbeitsblatt verwendet. Alternativ dazu kann man auch die vom FSMR aktuell gemessene und angezeigte Typ A-Unsicherheit (STD UNCERT(A) im Display des FSMR) anstelle des N.A. (not available) eingeben. Das Excel-Arbeitsblatt ist so programmiert, dass ein numerischer Wert in dieser Zelle Vorrang vor dem errechneten hat und zur Berechnung der Gesamtmessunsicherheit herangezogen wird.

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

	A	B	C	D	E	F
1	FSMR Relative Level Measurement Uncertainty					
2	(device under test changes VSWR with level change within specification)					
3		Distribution function	Data	Calcul. interim results	Unit	Standard Uncertainty in dB
4	Reference Level in dBm		0	1,000E-03	W	
5	Relative Level to measure/dB		-110			
6	Range to Range Error/dB		0,005			
7						
8	Uncertainty due to Linearity					
9	Calculated Dynamic range			110	dB	
10	Calculated linearity error limit at level to measure	gaussian (k=2)		0,075	dB	
11	Resultant standard uncertainty due to linearity					0,038
12						
13	Mismatch Generator Output - FSMR input	U-shaped				
14	min. FSMR attenuation (10 dB or 0 dB)/dB		0	1,000		
15	VSWR Generator		1,5	0,200	--	
16	VSWR FSMR 50/10 dB attenuation		1,3	0,130	--	
17	VSWR FSMR 0 dB attenuation		2	0,333	--	
18	Standard Uncertainty incl. Range Switching			0,224		
19		1 Range (50dB)				
20		2 Ranges (50/10dB)				
21		or 3 Ranges (50/10/10 dB)		0,225		
22		3 Ranges (50/10/0dB)		0,492		
23	Type A Uncertainty due to S/N (calculated)					
24	Typ. Displayed Average Noise Level (normalized to 10 Hz) in dBm		-144			
25	MeasTime/ms		400			
26	Number of AVG		64			
27	Calculated NoiseBW			9,75	Hz	
28	Calculated S/N			31,61	dB	
29	Calculated standard uncertainty due to S/N and AVG			0,0289	dB	
30	FSMR's Displayed Meas. Type A Uncertainty due to S/N and AVG in dB		N.A.			
31	Standard uncertainty due to S/N in dB used for Combined Uncertainty calculation					0,029
32	Combined Standard Uncertainty of Relative Level Measurement in dB					0,494
33	Expanded Uncertainty of Relative Level Measurement in dB (k=2)					0,988

Spreadsheet 2: Berechnung der relativen Messunsicherheit des FSMR

Man erkennt, dass die durch die Fehlanpassung von Generator und FSMR verursachte Messunsicherheit den Hauptanteil der Gesamtmessunsicherheit ausmacht. Die Fehler aufgrund der Linearität des FSMR sowie die Typ A-Unsicherheit tragen dagegen nicht nennenswert zur Gesamtunsicherheit bei.

Reduktion der Messunsicherheit aufgrund der VSWR

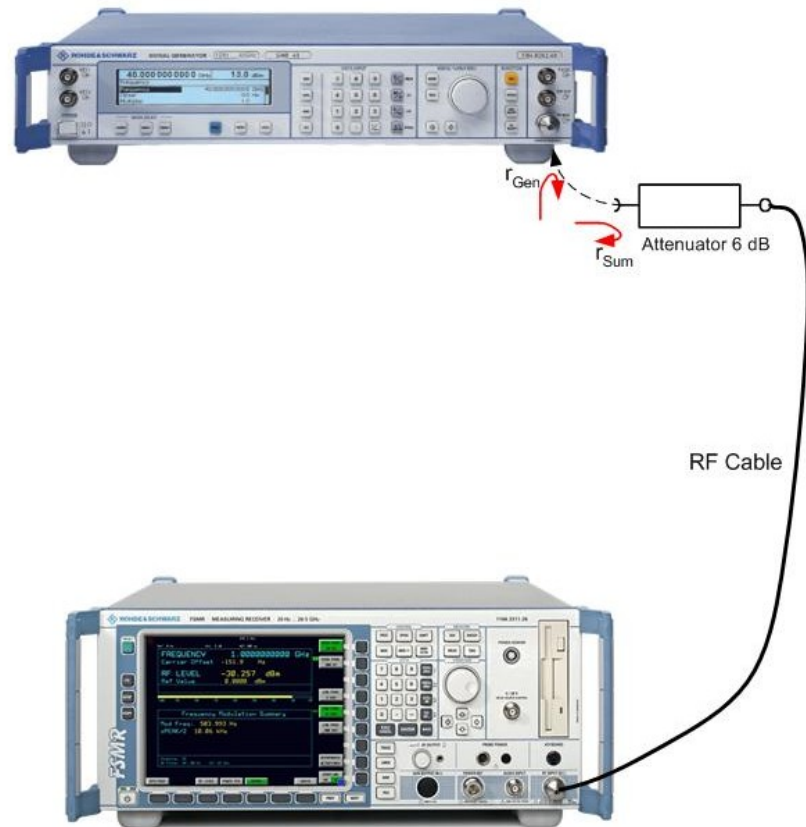


Abbildung 11: Messaufbau zur relativen Pegelmessung mit dem FSMR mit vorgeschaltetem Dämpfungsglied

Das VSWR des FSMR und die dadurch verursachte Messunsicherheit lassen sich durch Vorschalten eines geeigneten Präzisionsdämpfungsglieds z.B. mit 6 oder 10 dB Dämpfung deutlich verringern. Allerdings reduziert sich dadurch auch der Messpegel am FSMR-Eingang und damit der Signal-Rausch-Abstand. Dadurch wiederum erhöht sich die Typ A-Messunsicherheit. Die Verwendung eines externen Dämpfungsglieds ist noch effektiver als die Benutzung der FSMR internen Dämpfungseinstellung 10 dB (FSMR-Funktion: *Min. Attenuation 10 dB*), da damit wesentlich niedrigere VSWR-Werte erreicht werden (bis typ. 1,1 oder weniger bei Frequenzen bis zu einigen GHz). Es ist vorteilhaft, das Dämpfungsglied direkt auf den zu messenden Generator anzuschrauben und nicht hinter dem Messkabel. Bei hochwertigen Messkabeln ($VSWR < 1,2$) kann man dann das Kabel in der Berechnung vernachlässigen, da das VSWR des FSMR dominiert.

Im Folgenden ist das zum beschriebenen Messaufbau mit Dämpfungsglied gehörende Excel-Spreadsheet eingefügt. Zusätzlich zu Tabelle 2 sind jetzt noch die Dämpfung des externen Dämpfungsglieds (im Originalzustand des Excel-Arbeitsblatts: 10 dB) sowie die spezifizierte (oder gemessene) VSWR des Dämpfungsglieds (im Originalzustand des Excel-Arbeitsblatts: 1,1) einzugeben.

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

	A	B	C	D	E	F
1	FSMR Relative Level Measurement Uncertainty (attenuator in front of FSMR input):					
2		Distribution function	Data	Calcul. interim results	Unit	Standard Uncertainty in dB
3	Reference Level in dBm		0	1,000E-03	W	
4	Relative level to measure/dB		-110			
5	Range to Range Error/dB		0,005			
6						
7	Uncertainty due to Linearity					
8	Calculated Dynamic range			110	dB	
9	Calculated linearity error at level to measure	gaussian (k=2)		0,075	dB	
10	Calculated Standard deviation of linearity error					0,038
11						
12	Mismatch Generator Output - FSMR input	U-shaped				
13	min. FSMR attenuation (10 dB or 0 dB)/dB		0	1,0000		
14	Attenuation of attenuator in front of FSMR input		10	0,3162	--	
15	VSWR generator		1,5	0,2000		
16	VSWR attenuator		1,1	0,0476	--	
17	VSWR FSMR 50/10 dB attenuation		1,3	0,1304	--	
18	VSWR FSMR 0 dB attenuation		2	0,3333		
19	Standard Uncertainty incl. Range Switching			0,0127	--	
20				0,085		
21		1 Range (50dB)				
22		2 Ranges (50/10dB)				
23		or 3 Ranges (50/10/10 dB)		0,088		
24		3 Ranges (50/10/0dB)		0,105		
24	Type A Uncertainty due to S/N (calculated)					0,105
25	Typ. Displayed average Noise Level (normalized to 10 Hz) in dBm		-144			
26	MeasTime/ms		400			
27	Number of AVG		64			
28	Calculated NoiseBW			9,75	Hz	
29	Calculated S/N			21,61	dB	
30	Calculated standard uncertainty due to S/N and AVG			0,094	dB	
31	Displayed Meas. Type A Uncertainty due to S/N and AVG in dB		N.A.			
32	Standard uncertainty due to S/N in dB used for Combined Uncertainty calculation					0,094
33						
34	Combined Standard Uncertainty of Relative Level Measurement in dB					0,146
34	Expanded Combined Uncertainty of Relative Level					
35	Measurement in dB (k=2)					0,292

Spreadsheet 3: Berechnung der relativen Messunsicherheit des FSMR mit vorgeschaltetem Dämpfungsglied

Die Standardabweichung der Messunsicherheit aufgrund der Fehlanpassung reduziert sich für das gewählte Beispiel dank des vorgeschalteten Dämpfungsglieds von 0,49 dB (Spreadsheet 2) auf 0,1 dB (Spreadsheet 3). Dagegen erhöht sich geringfügig die Messunsicherheit Typ A, da das Dämpfungsglied den Pegel am Eingang des FSMR entsprechend seiner Dämpfung reduziert und damit das Signal-Rausch-Verhältnis verringert. Nimmt man wiederum eine längere Messzeit z.B. durch Vergrößerung des Mittelungsfaktors (um den Faktor 4 bei einem 6 dB Dämpfungsglied) in Kauf, kann man diesen Effekt kompensieren. Insgesamt reduziert sich die Expanded Combined Standard Uncertainty zwischen Spreadsheet 2 und 3 von 0,99 dB auf 0,29 dB bei gleicher Messzeit.

Absolute RF-Leistungsmessung bei kleinen Pegeln

Für Leistungsmessungen mit dem FSMR außerhalb des Messbereichs des Power Sensors, also unterhalb von -20 dBm bei Verwendung eines NRP-Z51, normalisiert man den Messempfänger bei einem Bezugspegel (z.B. 0 dBm) auf die Power Sensor-Anzeige (mit Softkey CAL ABS Power). Der FSMR zeigt dann im Messempfängerbetrieb die Bezugsleistung so genau an wie vorher die mit dem Messkopf gemessene. Wegen der Normierung tritt zunächst kein Zusatzfehler durch die im Vergleich zum Power Sensor höhere VSWR des FSMR-RF-Eingangs auf.

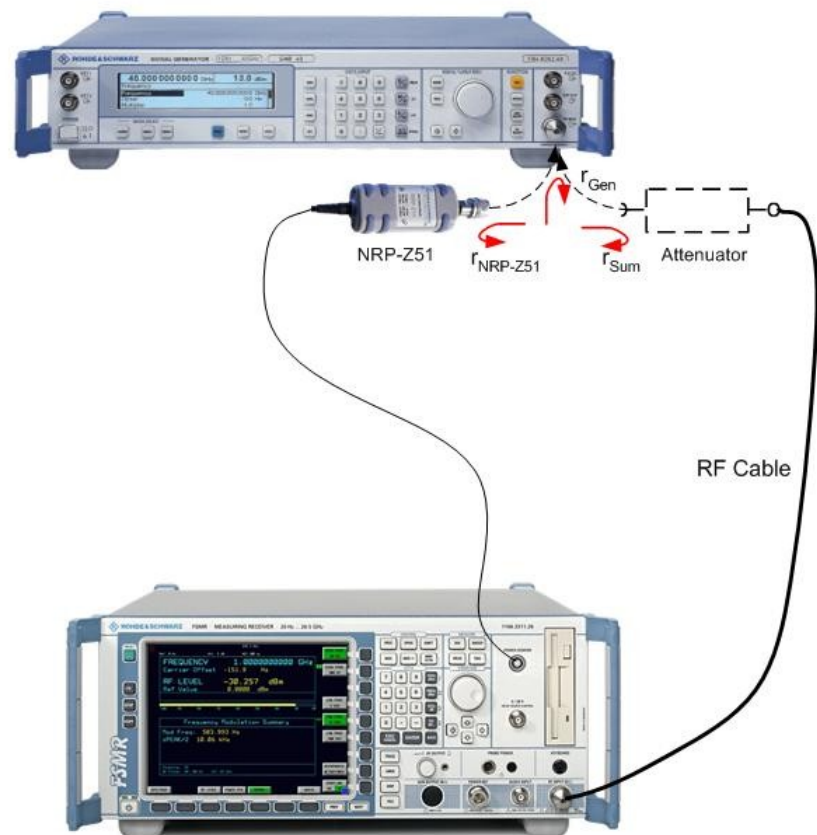


Abbildung 12: Messaufbau zur Leistungsmessung mit dem FSMR mit NRP-Z51 (wahlweise mit externem Dämpfungsglied)

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

Bei einer Reduzierung der Generatorleistung ändert sich das VSWR des Generators normalerweise, sobald der Pegelteiler am Generatorausgang umschaltet. In diesem Fall tritt ein Zusatzfehler in Abhängigkeit der VSWR von FSMR und Generator auf. Um diesen klein zu halten, ist es auch für absolute Leistungsmessungen mit dem FSMR immer empfehlenswert, ein externes Dämpfungsglied vor dem FSMR-Messkabel zu verwenden.

Im Folgenden finden sich zwei Beispiele für eine Unsicherheitsberechnung einer absoluten Pegelmessung bis -110 dBm mit und ohne vorgeschaltetem Dämpfungsglied:

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

	A	B	C	D	E	F
1	FSMR Absolute Power Measurement Uncertainty 100 MHz to 4 GHz:					
2	(Reference Measurement with NRP-Z51)					
3		Distribution function	Data	Calcul. interim results	Unit	Standard Uncertainty in dB (1 σ).
4	Reference Level in dBm		0	1,000E-03	W	
5	Specification of Display noise in nW (10,24s integration time)		30			
6	Display noise (1 s integration time)	gaussian (k=2)		9,60E-08	W	
7	Standard Uncertainty					0,000
8						
9	Zero Offset in nW	gaussian (k=2)	50			
10	Standard Uncertainty					0,000
11						
12	Zero Drift in nW	gaussian (k=2)	20			
13	Standard Uncertainty					0,000
14						
15	Calibration uncertainty in dB (20 to 25 °C)	gaussian (k=2)	0,057			
16	Standard Uncertainty					0,029
17						
18	Linearity Error in dB	gaussian (k=2)	0,02			
19	Standard Uncertainty					0,010
20						
21						
22	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor and Matched Source (in dB)					
23						0,030
24	Uncertainty due to mismatch of power sensor					
25	VSWR _{Sensor}		1,15	0,0698	--	
26	VSWR _{Generator}		1,5	0,2000	--	
27	Standard Uncertainty					0,0861
28	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor in dB					
29						0,091
30	FSMR Relative Level Measurement Uncertainty:					
31						
32	Level to measure/dBm		-110			
33	Range to Range Error/dB		0,005			
34						
35	Uncertainty due to Linearity					
36	Calculated Dynamic range			110	dB	
37	Calculated linearity error at level to measure	gaussian (k=2)		0,065	dB	
38	Calculated Standard Uncertainty due to linearity error					0,033
39						
40	Uncertainty due to Mismatch					
41	min. FSMR attenuation (10 dB or 0 db)/dB	U-shaped	0	1,0000		
42	VSWR Generator		1,5	0,2000		
43	VSWR FSMR 50/10 dB attenuation		1,3	0,1304	--	
44	VSWR FSMR 0 dB attenuation		2	0,3333		
45						
46				0,224	dB	
47						
48				0,225	dB	
49	Calculated Standard Uncertainty			0,492	dB	
50						0,492
51	Type A Uncertainty due to S/N					
52	Typ. Displayed average Noise Level (normalized to 10 Hz) in dBm		-144			
53	MeasTime/ms		400			
54	Number of AVG		64			
55	Calculated NoiseBW			9,75	Hz	
56	Calculated S/N			31,61	dB	
57	Calculated standard uncertainty due to S/N and AVG			0,029	dB	
58	Displayed Meas. Type A Uncertainty due to S/N and AVG in dB		N.A.			
59	Standard uncertainty due to S/N in dB used for Combined Uncertainty calculation					0,029
60						
61	Combined Standard Uncertainty of Absolute Level Measurement in dB					
62	Expanded Combined Uncertainty of Absolute Level Measurement in dB (k=2)					
				1,004		

Spreadsheet 4: Berechnung Messunsicherheit des FSMR mit Power Sensor NRP-Z51 für absolute Leistungsmessung (ohne vorgeschaltetes Dämpfungsglied)

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

	A	B	C	D	E	F
1	FSMR Absolute Power Measurement Uncertainty 100 MHz to 4 GHz:					
2	(Reference Measurement with NRP-Z51, Attenuator in Front of FSMR RF Input)					
3		Distribution function	Data	Calcul. interim results	Unit	Standard Uncertainty in dB (1 σ).
4	Reference Level in dBm		0	1,000E-03	W	
5	Specification of Display noise in nW (10,24s integration time)		30			
6	Display noise (1 s integration time)	gaussian (k=2)		9,60E-08	W	
7	Standard Uncertainty					0,000
8						
9	Zero Offset in nW	gaussian (k=2)	50			
10	Standard Uncertainty					0,000
11						
12	Zero Drift in nW	gaussian (k=2)	20			
13	Standard Uncertainty					0,000
14						
15	Calibration uncertainty in dB (20 to 25 °C)	gaussian (k=2)	0,057			
16	Standard Uncertainty					0,029
17						
18	Linearity Error in dB	gaussian (k=2)	0,02			
19	Standard Uncertainty					0,010
20						
21						
22	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor and Matched Source (in dB)					
23						0,030
24	Uncertainty due to mismatch of power sensor					
25	VSWR Sensor		1,15	0,0698	--	
26	VSWR Generator		1,5	0,2000	--	
27	Standard Uncertainty					0,0861
28	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor in dB					
29						0,091
30	FSMR Relative Level Measurement Uncertainty:					
31						
32	Level to measure/dBm		-110			
33	Range to Range Error/dB		0,005			
34						
35	Uncertainty due to Linearity					
36	Calculated Dynamic range			110	dB	
37	Calculated linearity error at level to measure	gaussian (k=2)		0,065	dB	
38	Calculated Standard Uncertainty due to linearity error					0,033
39						
40	Uncertainty due to Mismatch					
41	min. FSMR attenuation (10 dB or 0 dB)/dB	U-shaped	0	1,0000		
42	Attenuation of attenuator in front of FSMR input		10	0,3162	--	
43	VSWR Generator		1,5	0,2000		
44	VSWR attenuator		1,1	0,0476	--	
45	VSWR FSMR 50/10 dB attenuation		1,3	0,1304	--	
46	VSWR FSMR 0 dB attenuation		2	0,3333		
47						
48						
49		1 Range (50dB)		0,085	dB	
50		2 Ranges (50/10dB)				
51		or 3 Ranges (50/10/10 dB)		0,088	dB	
52	Calculated Standard Uncertainty	3 Ranges (50/10/0dB)		0,105	dB	0,105
53	Type A Uncertainty due to S/N					
54	Typ. Displayed average Noise Level (normalized to 10 Hz) in dBm		-144			
55	MeasTime/ms		400			
56	Number of AVG		64			
57	Calculated NoiseBW			9,75	Hz	
58	Calculated S/N			21,61	dB	
59	Calculated standard uncertainty due to S/N and AVG			0,094	dB	
60	Displayed Meas. Type A Uncertainty due to S/N and AVG in dB		N.A.			
61	Standard uncertainty due to S/N in dB used for Combined Uncertainty calculation					0,094
62						
63	Combined Standard Uncertainty of Absolute Level Measurement in dB					
64	Expanded Combined Uncertainty of Absolute Level Measurement in dB (k=2)					
				0,343		

Spreadsheet 5: Berechnung der Messunsicherheit des FSMR mit Power Sensor NRP-Z51 für absolute Leistungsmessung (mit vorschaltetem Dämpfungsglied vor FSMR Eingang)

Auch für absolute Leistungsmessung ergibt sich wie vorher bei Verwendung eines externen Dämpfungsglieds eine deutlich verringerte Gesamtmessunsicherheit. Im angegebene Beispiel ist diese 0,34 dB mit Dämpfungsglied gegenüber 1 dB ohne Dämpfungsglied.

Messung mit dem Power Sensor Modul R&S NRP-Z27 /-Z37



Abbildung 13: Messaufbau mit Power Sensor Module NRP-Z27

Das Power Sensor Modul erlaubt eine Parallelmessung mit Powersensor und FSMR. Ein resistiver Power Splitter teilt die Leistung zwischen dem eigentlichen Power Sensor und dem FSMR-Empfängereingang. Dieser ist zusätzlich über ein 6 dB-Dämpfungsglied entkoppelt. Ein HF-Präzisionskabel verbindet den FSMR-Empfängereingang mit dem entsprechenden Ausgang (nach dem 6 dB-Dämpfungsglied) des Power Sensor Moduls. Der Resteinfluss des FSMR-Eingangs auf den Sensor wird numerisch korrigiert. Der Vorteil: Der Messvorgang verkürzt sich erheblich, da das zeitraubende Umschrauben zwischen den Messungen entfällt. Außerdem kann man nun die Kalibrierung auf den Powersensor automatisieren.

Die Einfügedämpfung des Power Sensor Moduls (typ. 13 dB, max. 15 dB bis 4 GHz) reduziert allerdings entsprechend die Eingangsempfindlichkeit des FSMR, so dass es für kleinste Pegel (< ca. -120 dBm) eventuell besser ist, ohne Power Sensor Modul zu messen, solange kein Vorverstärker zum Einsatz kommt.

Die Messunsicherheit der Power Sensor Module ist in absoluten Leistungen bei angeschlossenem FSMR kalibriert. Damit entfällt die ansonsten aufwändige Berücksichtigung des Power Splitters in der Unsicherheitsanalyse.

Mit Hilfe des nachfolgenden Excel Spreadsheets kann man wieder ganz einfach die Messunsicherheit bei Messung mit dem Power Sensor Modul berechnen.

Gegenüber Spreadsheet 5 entfallen die Eingaben für das Dämpfungsglied. Dagegen sind folgende Data-Eingaben zusätzlich notwendig:

- **VSWR des Power Sensor Moduls** entsprechend der Messfrequenz (1,18 bei 4 GHz)
- **Isolation zum FSMR Eingang** (je nach Zutreffen numerisch korrigierter oder nicht korrigierter Wert, im Beispiel wird 40 dB als mittlerer korrigierter Wert angenommen)
- **Dämpfung des Power Sensor Moduls** zum FSMR Eingang entsprechend der Messfrequenz (typ. 13 dB bei 4 GHz)

Pegelmessunsicherheiten beim R&S FSMR

	A	B	C	D	E	F
1	FSMR absolut level measurement uncertainty with NRP-Z27 power sensor module 100 MHz to 4 GHz					
2		Distribution	Data	Value	Unit	Standard
3	Power Sensor Measurement					
4	Test Level in dBm		0	1,000E-03	W	
5	Specification of Display noise in nW (10,24s integration time)		240			
6	Display noise (1 s integration time)	gaussian (k=2)		7,68E-07	W	
7	Standard Uncertainty					0,002
8						
9	Zero Offset in nW	gaussian (k=2)	400			
10	Standard Uncertainty					0,001
11						
12	Zero Drift in nW	gaussian (k=2)	160			
13	Standard Uncertainty					0,000
14						
15	Calibration uncertainty in dB (20 to 25 °C)	gaussian (k=2)	0,07			
16	Standard Uncertainty					0,035
17						
18	Linearity Error in dB	gaussian (k=2)	0,02			
19	Standard Uncertainty					0,010
20	Combined Standard Uncertainty of Power Measurement with Power Sensor and Matched Source (in dB)					0,036
21						
22	Uncertainty due to mismatch					
23	VSWR of FSMR Input at 50/10 dB attenuation		1,3	0,13		
24	VSWR of FSMR Input at 0 dB attenuation		2	0,33		
25	Isolation of FSMR-Input (uncorrected or corrected value whatever applies)		40	0,010		
26	VSWR _{Sensor Module}		1,18	0,0826	--	
27	VSWR _{Generator}		1,5	0,2000	--	
28	Calculated Standard Uncertainty due to Mismatch at Reference Measurement					
29						0,102
30	Combined Standard Uncertainty of Reference Power Measurement with Power Sensor in dB					0,109
31						
32	FSMR relative level measurement:					
33	Level to measure/dBm		-110			
34	Range to Range Error/dB		0,005			
35	Uncertainty due to Linearity					
36	Resultant Dynamic range			110	dB	
37	Resultant linearity error at level to measure	gaussian (2σ)		0,075	dB	
38	Resultant Standard deviation of linearity error					0,038
39						
40	Uncertainty due to mismatch change of FSMR (for absolute indication):					
41	(condition: output impedance of DUT changes)					
42	Minimum FSMR Attenuation (0dB or 10 dB)		0			
43	Standard Uncertainty due to mismatch change/dB					
44						
45		1 Range (50dB)		0,000		
46		2 Ranges 50/10dB				
47		or 3 Ranges 50/10/10 dB		0,002		
48		3 Ranges 50/10/0 dB		0,013		0,013
49	Type A Uncertainty due to S/N (calculated)					
50	Typ. Displayed average Noise Level (normalized to 10 Hz) in dBm		-144			
51	Attenuation NRP-Z27Input to FSMR Input		13			
52	MeasTime/ms		400			
53	Number of AVG		64			
54	Resultant NoiseBW			9,75	Hz	
55	Resultant S/N			18,61	dB	
56	Calculated standard uncertainty due to S/N and AVG			0,128	dB	
57	Displayed Meas. Type A Uncertainty due to S/N and AVG in dB		N.A.			
58	Standard uncertainty due to S/N in dB used for Combined Uncertainty calculation					0,128
59						
60	Combined Standard Uncertainty of Absolute Level Measurement in dB					0,173
61	Expanded Uncertainty of Absolute Level Measurement in dB (k=2)					0,345

Spreadsheet 6: Zur Berechnung der absoluten Messunsicherheit mit Power Sensor Modul NRP-Z27/-Z37

Fazit:

Mit dem Power Sensor Modul NRP-Z27/37 erreicht der FSMR mit 0,34 dB (bei numerischer Isolationskorrektur) die ebenso geringe Messunsicherheiten wie mit dem Power Sensor NRP-Z51 und einem Präzisionsdämpfungsglied. Der besondere Vorteil ist natürlich die Automatisierbarkeit der Messungen, da das zeitraubende und auch materialverschleissende Umschrauben entfällt.

Reduzierung der Messunsicherheiten aufgrund des SNR mit Vorverstärker

Der Vorverstärker (FSU-B25 oder FSMR-B23) reduziert das Eingangsrauschen des FSMR und verbessert damit wesentlich das SNR bei kleinen Eingangsleistungen. Die DANL des FSMR26 bei 4 GHz verringert sich damit von typ. -144 dBm auf typ. -153 dBm, also um 9 dB. Dies bedeutet dass man bei annähernd gleicher Gesamtmessunsicherheit und gleicher Messzeit im Vergleich zu Messungen ohne Vorverstärker noch Pegel messen kann, die etwa 10 dB kleiner sind. Die Excel-Spreadsheets 2 – 6 eignen sich auch zur Bestimmung der Messunsicherheit bei Aufbauten mit Vorverstärker. Man muss hierbei lediglich die Zahl für den **Displayed Average Noise Level** gegen den entsprechenden Wert austauschen, der mit Vorverstärker-Option spezifiziert ist (z.B. auf -153 dBm bei Messfrequenz 4 GHz und Option FSMR-B23). Die spezifizierten VSWR-Werte gelten auch, wenn ein Vorverstärker eingefügt ist.

Vermeiden von Messunsicherheiten aufgrund des Generatorstörhubs und Frequenzdrift

Im Grundzustand mit einer voreingestellten Messzeit von 400 ms beträgt die Bandbreite des Narrow-Detektors etwa 10 Hz (3,86/400 ms). Dieser Wert ist auch in den Excel-Arbeitsblättern voreingestellt. Bei Generatoren mit starkem Störhub, insbesondere bei Mikrowellengeneratoren, kann jedoch eine Messbandbreite von etwa 10 Hz zu schmal sein, um die komplette Signalleistung zu erfassen. Anzeichen dafür sind schon bei der Bezugspegelmessung eine schwankende Pegelanzeige des FSMR, die um mehr als etwa 0,1 dB variiert.

In diesem Fall kann man ausnutzen, dass die Bandbreite des Narrow-Detektors von der Messzeit abhängt. Eine auf die Hälfte verkürzte Messzeit (*MEAS TIME MANUAL* im **SWEEP** Menü) zieht eine Verdoppelung der Bandbreite des Narrow-Detektors nach sich. Gibt man also eine kürzere Messzeit ein, erhöht sich automatisch die Bandbreite des Narrow Detektors. Möglicherweise lässt sich mit dieser „Bandbreitenanpassung“ die gesamte Signalleistung erfassen.

Nachteil dieses Vorgehens: Die höhere Bandbreite verringert das Signal-Rausch-Verhältnis, was zu einer größeren Typ A-Unsicherheit führt. Als Gegenmaßnahme kann man wiederum den Mittelungsfaktor erhöhen. Bei einer Halbierung der Messzeit gleicht ein verdoppelter Mittelungsfaktor die höhere Typ A-Unsicherheit aus.

Der FSMR toleriert Frequenzfehler und folgt dem gemessenen Signal solange es sich innerhalb der Messbandbreite (Demod BW \pm 6.25 kHz im Grundzustand) befindet. Ein Frequenzfehler, sowie eine langsame Frequenzdrift des zu messenden Generators haben damit keinen Einfluss auf die Pegelmessgenauigkeit des FSMR.

Achtung! Bei kleinen Signalleistungen unterhalb von etwa -105 dBm, oder wenn das vom FSMR gemessene SNR kleiner als 35 dB ist, verharrt der FSMR auf der zuletzt gemessenen Frequenz. Um die Pegelmessgenauigkeit nicht zu gefährden, darf in diesem Fall das Signal keine Frequenzdrift aufweisen. Es ist deshalb empfehlenswert, den Generator auf den FSMR über die Referenzfrequenz zu synchronisieren, um jede Frequenzdrift während der Messung auszuschließen.

6 Begriffserklärungen und Glossar

Folgende Begriffe finden in dieser Application Note Verwendung:

Standardabweichung

Die Standardabweichung einer Reihe von Messwerten ist ein Maß für die Streuung der Messergebnisse um den Mittelwert:

$$\sigma := \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Formel 7}$$

Dabei ist

σ die empirische Standardabweichung

\bar{x} der Erwartungswert 1. Ordnung (Mittelwert)

$$\bar{x} := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{Formel 8}$$

N die Anzahl der Messwerte

x_i der Messwert Nr. i

Standardunsicherheit

Charakterisiert die Standardabweichung die Messunsicherheit eines Kennwerts, spricht man von der Standardunsicherheit.

Kombinierte Standardunsicherheit

Standardunsicherheit eines Messergebnisses, wenn mehrere, voneinander unabhängige Größen auf das Ergebnis Einfluss haben. Sie ist gleich der positiven Quadratwurzel der Quadratsumme der einzelnen Größen.

$$u_c := \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad \text{Formel 9}$$

u_c : kombinierte Standardunsicherheit

u_1, u_2, u_n : Standardunsicherheiten einzelner Einflussgrößen

Erweiterte Unsicherheit

Mit einem Erweiterungsfaktor k multiplizierte Standardunsicherheit. Bei k = 2 kann man annehmen, dass in 95% aller Fälle das Messergebnis innerhalb dieser Unsicherheitsangabe liegt.

Normalverteilung

Viele natur-, wirtschafts- und ingenieurwissenschaftliche Vorgänge lassen sich durch die Normalverteilung exakt oder in sehr guter Näherung beschreiben. Dies gilt auch, wenn die Messunsicherheit verschiedene Ursachen hat.

Die Normalverteilung ist gegeben durch die Wahrscheinlichkeitsdichte:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}}$$

Formel 10

wobei σ die Standardabweichung und μ der Erwartungswert der Normalverteilung sind.

Die Normalverteilung wird auch Gaußverteilung genannt, da ihre Wahrscheinlichkeitsdichte durch eine Gaußsche Glockenkurve dargestellt wird, die symmetrisch zum Erwartungswert μ ist und deren Höhe und Breite von σ abhängt.

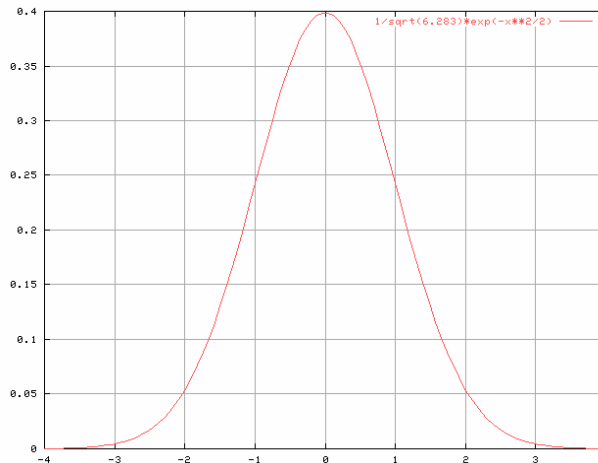


Abbildung 14: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung

Die Fläche unter der Kurve ist gleich 1. Teilflächen unter der Kurve geben Wahrscheinlichkeiten an. Markiert sind die Konfidenzintervalle 1, 2 und 3. Gibt man das Intervall $[-1, 1]$ als Unsicherheit an, liegt das Messergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% innerhalb des angegebenen Intervalls. Im Intervall $[-2, 2]$ erhöht sich die Wahrscheinlichkeit auf 95,5%, im Intervall $[-3, 3]$ liegt das Messergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,7% im angegebenen Intervall.

Gleichverteilung

Bei einer Gleichverteilung ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Messwerts innerhalb der Grenzen a und b konstant.

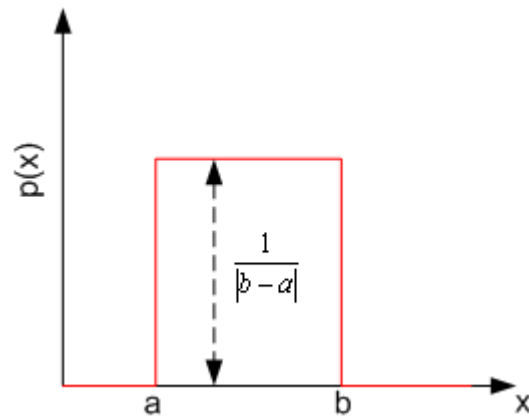


Abbildung 15: Verteilungsdichtefunktion $p(x)$ bei Gleichverteilung zwischen den Grenzen a und b

Der Erwartungswert μ der Gleichverteilung ist $\mu = \frac{b+a}{2}$ Formel 11

und die Standardabweichung σ ist $\sigma := \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}}$ Formel 12

Für symmetrische Fehlergrenzen ($a = -b$) ist der Erwartungswert 0, und die Standardabweichung σ berechnet sich zu:

$$\sigma := \frac{b}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 13}$$

U-Verteilung

Eine U-förmige Wahrscheinlichkeitsverteilung findet man bei Messabweichungen aufgrund der Fehlanpassung. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Messwert in der Nähe des Maximums auftritt ist größer als die eines kleinen Messwerts.

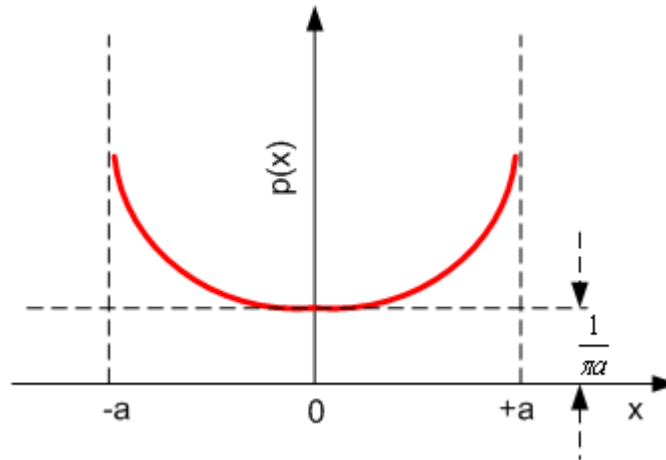


Abbildung 16: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(x)$ bei U-förmiger Verteilung

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(x)$ wird beschrieben durch:

$$p(x) := \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}$$

Formel 14

mit $-a < x < +a$

Die Standardabweichung errechnet sich aus $\sigma := \frac{a}{\sqrt{2}}$ Formel 15

Typ A Messunsicherheit

Als Typ A Messunsicherheit bezeichnet man die Messunsicherheit aufgrund statistischer Schwankungen des Messwerts z.B. aufgrund des thermischen Rauschens.

7 Literatur

1. "Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen", DIN Deutsches Institut für Normung (Deutsche Übersetzung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ GUM)
2. Measuring Receiver R&S® FSMR Product Brochure PD 0758.2319.12 · Version 01.00 · November 2004
3. Measuring Receiver R&S® FSMR Specifications PD 0758.2319.22 Version 2.0/March 2005
4. Power Meter R&S® NRP Data Sheet PD 0757.7023.21
5. Power Sensors R&S® NRP-Z51, -Z55 Technical Information (TI_NRP-Z51_55.doc 09/2003)
6. Power Sensor Modules R&S® NRP-Z27, -Z37 Technical Information (TI_NRP-Z27_37.doc 12/2005)
7. ETSI TR 100 028-2 V1.4.1 (2001-12) Annex D

R&S-Unterlagen finden Sie im Internet unter www.rohde-schwarz.com

8 Zusätzliche Informationen

Diese Application Note und die zugehörigen Arbeitsblätter werden von Zeit zu Zeit aktualisiert. Bitte besuchen Sie auf der R&S homepage www.rohde-schwarz.com unter "Application Notes" die Webseite **1MA92** um die aktuellen Versionen herunterzuladen.

Bitte kontaktieren Sie TM-Applications@rsd.rohde-schwarz.com für Kommentare und Vorschläge.

9 Bestellinformationen

Type of instrument Name of instrument	Range	Ordering number
R&S FSMR3	20 Hz to 3,6 GHz	1166.3311.03
R&S FSMR26	20 Hz to 26,5 GHz	1166.3311.26
R&S FSMR50	20 Hz to 50 GHz	1166.3311.50
R&S NRP-Z51	1 μ W to 100 mW; DC to 18 GHz	1138.0005.02
R&S NRP-Z55	1 μ W to 100 mW; DC to 40 GHz	1138.2008.02
R&S NRP-Z27	4 μ W to 400 mW; DC to 18 GHz	1169.4102.02
R&S NRP-Z37	4 μ W to 400 mW; DC to 26.5 GHz	1169.3206.02
Options		
R&S FSMR B23	20 dB Preamplifier, 3,6 GHz to 26,5 GHz for FSMR26	1157.0907.05
R&S FSMR B223	Yig-Preselector 3,6 GHz to 26,5 GHz with 20 dB Preamplifier, 3,6 GHz to 26,5 GHz for FSMR26	1157.1955.26
R&S FSMR B25	Electronic Attenuator and 20 dB Preamplifier (3,6 GHz)	1044.9298.02



ROHDE & SCHWARZ

ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG · Mühlhofstraße 15 · D-81671 München · P.O.B 80 14 69 · D-81614 München ·
Telephone +49 89 4129 -0 · Fax +49 89 4129 - 13777 · Internet: <http://www.rohde-schwarz.com>

This application note and the supplied programs may only be used subject to the conditions of use set forth in the download area of the Rohde & Schwarz website.