

Messung des Phasenrauschens mit den Spektrumanalysatoren der FSE-Familie

Application Note 1EPAN 16D

Änderungen vorbehalten

02.10.95, Josef Wolf

Produkte:

FSEA 20/30, FSEB 20/30

Meßgrößen

Neben der Frequenz, der Leistung und der Langzeitstabilität ist die Kurzzeitstabilität oder dessen



ROHDE & SCHWARZ

Äquivalent das Phasenrauschen eine wichtige Eigenschaft von Signalquellen. Zum Beispiel wird durch das Phasenrauschen von Umsetzoszillatoren bei Empfängern bei Anwesenheit eines starken Signals die Empfindlichkeit im Nachbar kanal bestimmt. Bei Sendern ist das Phasenrauschen des Sendeoszillators neben den Eigenschaften des Modulators mit verantwortlich für die abgestrahlte Leistung in den Nachbarkanälen. Das Phasenrauschen der verwendeten Oszillatoren oder Synthesizer und dessen Messung kommt daher bei Funkübertragungssystemen eine große Bedeutung zu.

Mathematisch kann das Ausgangssignal eines idealen Oszillators durch

$$u(t) = U_o \sin(2\pi f_o t)$$

beschrieben werden, wobei

U_o = Amplitude des Signals
 f_o = Frequenz des Signals und
 $2\pi f_o t$ = Phase des Signals

Beim realen Signal sind sowohl die Amplitude als auch die Phase des Signals Schwankungen unterworfen:

$$u(t) = (U_o + \varepsilon(t)) \sin(2\pi f_o t + \Delta\varphi(t))$$

wobei

$\varepsilon(t)$ = Amplitudenschwankung des Signals und
 $\Delta\varphi(t)$ = Phasenschwankung oder Phasenrauschen des Signals.

Beim Term $\Delta\varphi(t)$ für die Phasenschwankung sind zwei Arten zu unterscheiden:

- Deterministische Phasenschwankung aufgrund von Netzbrumm oder der mangelnden Unterdrückung der Referenzfrequenz bei Synthesizern, die sich in diskreten Stör linien bemerkbar macht, und
- zufällige Phasenschwankungen (=Phasenrauschen), die durch thermisches Rauschen, Schrotrauschen oder Flickerrauschen in den aktiven Elementen von Oszillatoren entstehen.

Ein Maß für das Phasenrauschen ist die Einseitenband-Rauschleistungsdichte bezogen auf ein Hertz Bandbreite:

$$S_{\Delta f}(f) = \frac{\Delta f_{rms}^2 \text{ rad}^2}{1 \text{ Hz Hz}}$$

In der Praxis benutzt man meistens den Einseitenbandrauschabstand L zur Charakterisierung der Phasenrauscheigenschaften eines Oszillators. Er ist definiert als das Verhältnis der Rauschleistung in einem Seitenband gemessen

in 1 Hz Bandbreite zur gesamten Signalleistung bei einem Frequenzabstand f_m vom Träger.

$$L(f_m) = \frac{P_{SSB}[1 \text{ Hz}]}{P_{\text{Signal}}}$$

Wenn die Modulationsseitenbänder durch Rauschen sehr klein sind, d.h., der Phasenhub sehr viel kleiner als 1 rad ist, kann die Rauschleistungsdichte in den Einseitenbandrauschabstand umgerechnet werden:

$$L(f) = \frac{1}{2} \cdot S_{\Delta f}(f).$$

Üblicherweise wird der Einseitenbandrauschabstand im logarithmischen Maßstab angegeben:

$$L_c(f_m) / [\text{dBc} / \text{Hz}] = 10 \cdot \log(L(f_m))$$

Meßmethoden

Die einfachste und schnellste Methode, das Phasenrauschen eines Oszillators zu bestimmen, ist die direkte Messung mit einem Spektrumanalysator. Dabei sind jedoch folgende Voraussetzungen an den Oszillator zu stellen:

- Die Drift des Oszillators muß gegenüber der Ablaufzeit der Spektrumanalyzers klein sein, da sonst während der Ablaufzeit der Oszillator seine Frequenz verändert und damit falsche Meßergebnisse erzielt werden. Diese Voraussetzung ist bei den in der Kommunikationstechnik üblichen Synthesizerquellen immer erfüllt, da diese an eine genügend stabile Referenz angebunden sind.
- Das Phasenrauschen der internen Oszillatoren des Spektrumanalysators muß genügend niedrig sein, damit die Eigenschaften des Meßobjekts bestimmt werden können und nicht die Eigenschaften der Spektrumanalysators gemessen werden. Beim FSE ist dies für sehr viele Anwendungen der Fall.

Eine weitere oft angewandte Methode ist die Messung mit einem Vergleichoszillator und einem Phasendetektor (BILD 1).

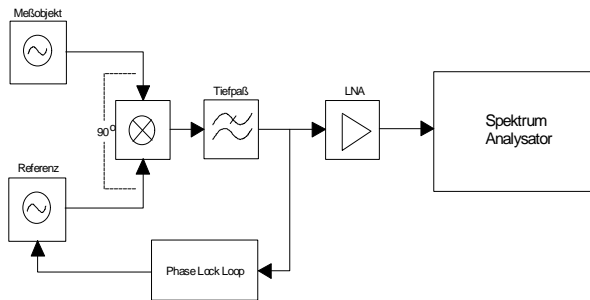


BILD 1 Meßaufbau zur Phasenrauschmessung mit einem Vergleichsoszillator

Der Vergleichsoszillator (Referenzoszillator) wird durch eine Regelschleife (PLL) mit sehr niedriger Regelbandbreite auf das Meßobjekt synchronisiert. Durch die Regelschleife wird die Phase der beiden Oszillatoren auf 90° Phasendifferenz eingestellt. Innerhalb der Regelbandbreite wird das Phasenrauschen des Meßobjekts ausgeregelt. Außerhalb der Regelbandbreite erscheint am Ausgang des Phasendetektors die Summe der Rauschleistungen des Referenz- und des Meßoszillators. Dieses wird in einem rauscharmen Verstärker (LNA) verstärkt und an einem Spektrumanalysator beginnend mit der Frequenz 0 Hz dargestellt.

Die Vorteile dieser Anordnung sind ein sehr hoher Dynamikbereich für die Messung, vorausgesetzt der Referenzoszillator ist spektral sehr sauber. Oft werden für die Messung an Quarzoszillatoren zwei gleiche Oszillatoren verwendet in der Annahme, daß beide Oszillatoren das gleiche Phasenrauschen besitzen. Vom Meßergebnis dürfen dann 3 dB abgezogen werden, da sich die Rauschleistungen summieren.

Die Nachteile der Meßmethode liegen auf der Hand:

- Die Anordnung verlangt zwei Oszillatoren mit gleicher Frequenz, die aufeinander synchronisiert werden müssen.
- Eine zusätzliche Phasenregelschleife und ein rauscharmer Verstärker sind notwendig.
- Die Kalibrierung ist aufwendig, da die Verstärkungen aller Komponenten in das Meßergebnis eingehen. Sie erfolgt durch Verstimmen der beiden Oszillatoren gegeneinander und Messung der AC-Spannung am Ausgang des LNA.

Aufgrund des Aufwands, der hier getrieben werden muß, wird man möglichst versuchen, das Phasenrauschen durch direkte Messung mit einem Spektrumanalysator zu bestimmen.

Dafür bietet der FSE mit seinen exzellenten Phasenrauschwerten die beste Voraussetzung.

Das folgende BILD 2 zeigt den Phasenrauschabstand des FSEA20 und des FSEA 30 abhängig vom Trägerabstand. Ab 100 kHz Abstand vom Träger sind beide Modelle des FSEA im Phasenrauschen identisch. Eine zusätzliche Schleife im FSEA30 reduziert dessen Phasenrauschen unter 100 kHz Trägerabstand gegenüber dem des FSEA20 erheblich. Optional kann der FSEA 20 auf die gleichen Phasenrauschwerte aufgerüstet werden (auch nachträglich).

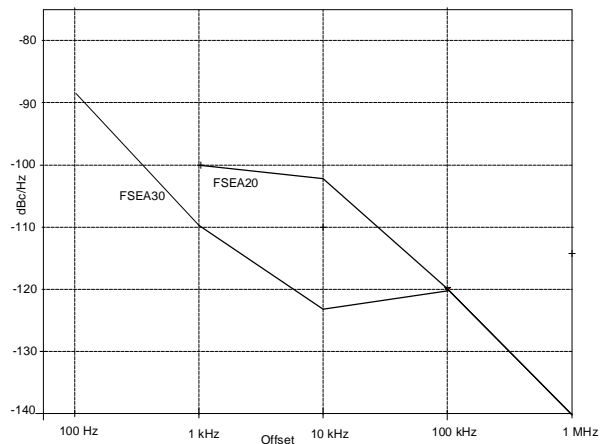


BILD 2 SSB-Phasenrauschen des FSEA20 und des FSEA30 bei 500 MHz Eingangsfrequenz

Zur direkten Messung des Phasenrauschens ist der FSE mit der Markerfunktion „Phase Noise“ ausgestattet. Mit ihr wird direkt der Einseitenband-Rauschabstand in dBc/Hz angezeigt. Die Korrekturfaktoren für die Rauschbandbreite der ZF-Filter, den logarithmischen Verstärker und die Bewertung des Detektors rechnet der FSE automatisch in das Meßergebnis ein.

Am folgenden **Beispiel** ist der Ablauf einer Phasenrauschmessung an einem Synthesizer beschrieben, der für Mobilfunkanwendungen zum Einsatz kommen könnte. Im Mobilfunkbereich werden sehr hohe Anforderungen an die Umsetzoszillatoren von Sendern gestellt, damit die geforderte Unterdrückung von Aussendungen in benachbarten Kanälen eingehalten werden können. Als Beispiel soll das Phasenrauschen eines Oszillators bei 1,91 GHz in 4 MHz Abstand vom Träger gemessen werden. Der Pegel des Oszillators betrage ca. 3 dBm.

Anmerkung:

Als Signalquelle wird im Beispiel der R&S-Signalgenerator SMHU verwendet. Die Meßergebnisse spiegeln daher das Phasenrauschen des

FSEA plus das Phasenrauschen des SMHU wider, da der Einseitenband-Rauschabstand bei beiden in derselben Größenordnung liegt.

1. Schritt: Pegel des Oszillators messen

- FSE in Grundeinstellung versetzen.
[PRESET]
- Mittenfrequenz des FSE auf 1,91 GHz einstellen:
[CENTER: 1.91 GHz]
- Span auf 10 MHz stellen:
[SPAN: 10 MHz]
- Referenzpegel auf +10 dBm einstellen:
[LEVEL REF: 10 dBm]
- Für niedrige Rauschanzeige die HF-Dämpfung auf Low Noise einstellen:
[LEVEL REF: ATTEN AUTO LOW NOISE]
- Marker einschalten und Signalpegel auf Referenzpegel stellen:
[MARKER MKR->: MKR->REF LEVEL].
Der FSE stellt den Marker 1 mit der Taste MKR-> automatisch auf das Signalmaximum und mit dem Softkey MKR->REF LEVEL stellt er den Referenzpegel auf den Markerpegel.

2. Schritt: Phasenrauschmarker einstellen

- Delta-Marker einschalten:
[MARKER: DELTA]
Der Delta-Marker wird an der Stelle des Hauptmarkers positioniert.
- Phasenrauschmessung im Deltamarker-menü einschalten:
[PHASE NOISE]
Der Bezugspegel wird durch eine horizontale Pegellinie (FXD), die Bezugsfrequenz durch eine vertikale Frequenzlinie (FXD) angezeigt.

- Delta-Marker auf den gewünschten Frequenzabstand einstellen, hier 4 MHz.
[4 MHz: ENTER]
- Der FSE zeigt im Markerfeld den Meßwert für das Phasenrauschen in dBc/Hz an.

3. Schritt: Signalmittelung einstellen:

- Videofilter auf Rauschbewertung stellen:
[COUPLING: COUPLING RATIO:
RBW/VBW NOISE [10]]
Zur Mittelung des Rauschens stellt der FSE die Videobandbreite auf 1/10 der Auflösungsbandbreite.

Anmerkung:

Aufgrund der Verringerung der Videobandbreite um den Faktor 10 verlängert sich die Sweepzeit bei im Vergleich zum Span kleinen Auflösungsbreiten bis auf das Zehnfache. Für maximale Meßgeschwindigkeit auf Kosten der Schwankungsbreite der Meßwerte kann die Videobandbreite gleich der Auflösungsbandbreite eingestellt werden.

- Tracemittelung einstellen:
[TRACE 1: AVERAGE]
Zur Stabilisierung der Meßwertanzeige führt der FSE eine gleitende Mittelung über 10 Sweeps durch. Gleichzeitig wird zur richtigen Rauschbewertung der Sample-Detektor eingestellt.

Das folgende BILD 3 zeigt eine Hardcopy des FSE-Bildschirms mit dem Meßsignal bei 1910 MHz (Trace 1). Der Phasenrauschwert im Markerfeld zeigt -141,12 dBc/Hz in 4 MHz Abstand an. Die zweite Meßkurve (Trace 2) zeigt das thermische Eigenrauschen des FSE an, das ohne Eingangssignal gemessen wurde. Die Begrenzung der Meßdynamik durch das Eigenrauschen ist dabei deutlich erkennbar.

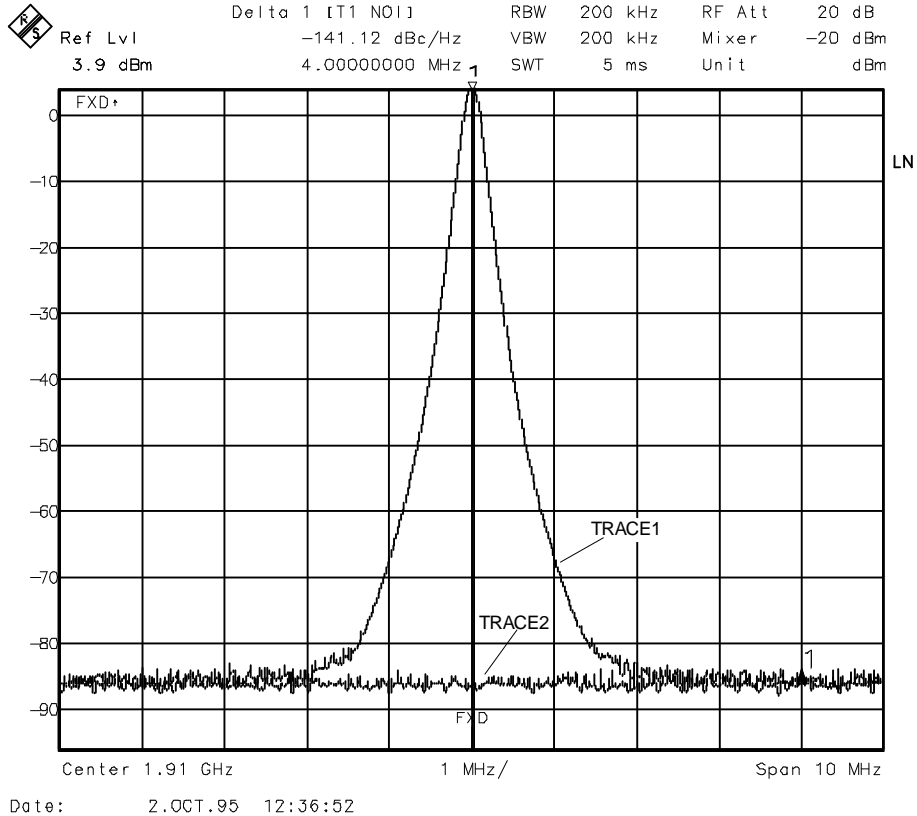


BILD 3 Phasenrauschmessung mit dem FSEA30 bei automatischer Dämpfungseinstellung. Die Meßdynamik ist durch das Eigenrauschen des FSE begrenzt.

Die Messung des Phasenrauschens ist durch zwei Effekte begrenzt:

- das Phasenrauschen der internen Oszillatoren und
- das thermische Eigenrauschen des Spektrumanalysators.

Die Effekte sind in der Rauschanzeige nicht trennbar, da sie beide aufgrund der Hüllkurvengleichrichtung des Spektrumanalysators als Amplitudenrauschen angezeigt werden. Das Eigenrauschen des FSE kann jedoch durch Trennung des Meßsignals vom HF-Eingang angezeigt werden. Der Anzeigewert des Phasenrauschens sollte ohne Eingangssignal deutlich (6 bis 10 dB) gegenüber dem Anzeigewert mit Eingangssignal abnehmen.

Um einen genügend hohen Abstand vom thermischen Eigenrauschen des HF-Eingangs zu erzielen, kann der FSE durch das Meßsignal übersteuert werden, ohne daß das Meßergebnis beeinflusst wird. Dies ist aufgrund der hohen Übersteuerungsfestigkeit des Signalzweigs bis zu den ZF-Filtern möglich. Der Pegel des

Meßsignals am Eingangsmischer darf mindestens 5 dBm betragen, ohne daß der Signalzweig bis zu den ZF-Filtern übersteuert wird. Die Übersteuerung nach den ZF-Filtern beeinflusst das Meßergebnis nicht, wenn der Bezugspegel gemessen wurde, ohne den FSE zu übersteuern.

Der Mischerpegel ist durch den Pegel des Eingangssignals und die gewählte HF-Dämpfung (RF ATT) bestimmt:

$$\text{Mixer Level} = P_{in} - \text{RF ATT},$$

wobei

Mixer Level = Mischerpegel,

P_{in} = Leistung des Eingangssignals in dBm

RF ATT = eingestellte HF-Dämpfung in dB

Das Meßsignal hat im Beispiel einen Pegel von 3,9 dBm. Welche HF-Dämpfung muß mindestens eingestellt werden, um den Signalzweig nicht zu übersteuern?

$$(\text{RF ATT})_{\min} = P_{in} - (\text{Mixer Level})_{\max}$$

$$(\text{RF ATT})_{\min} = 3,9 \text{ dBm} - 5 \text{ dBm} = -1,1 \text{ dB}$$

Das heißt, mit 0 dB HF-Dämpfung wird der FSE nicht übersteuert. Man wird daher für maximale Dynamik 0 dB HF-Dämpfung für die Messung des Phasenrauschens verwenden.

Diese Berechnung der minimal zulässigen HF-Dämpfung ist beim FSE nicht notwendig. Dank der Übersteuerungsanzeigen in allen relevanten Stufen des Signalzweigs meldet er am Bildschirm automatisch jede Übersteuerung bis zu den ZF-Filtern. Die Eingangsdämpfung kann daher so lange reduziert werden, bis der FSE OVLD (Overload) im Display meldet.

Der Referenzpegel wird dabei automatisch auf -10 dBm eingestellt. Das Phasenrauschen wird durch den Phasenrauschmarker nach wie vor richtig angezeigt, da der HF-Zweig an der Stelle des Rauschmarkers nicht übersteuert wird und der Referenzwert zur Phasenrauschmessung durch Änderung des Referenzpegels nicht verändert wird. Die Messung wird trotzdem immer richtig, da der FSE beim Einschalten der Phase-Noise-Funktion den Referenzwert festhält, d.h. REFERENCE FIXED wird automatisch eingeschaltet.

4. Schritt: PegelEinstellung optimieren

- HF-Dämpfung auf 0 dB einstellen:
[INPUT: RF ATTEN MANUAL: 0 dB].

Das folgende BILD 4 zeigt die Messung des Phasenrauschens bei 0 dB Eingangsdämpfung. Der Abstand zum thermischen Rauschen des FSE beträgt nun ca. 8 dB. Der Einseitenband-Rauschabstand des Synthesizers beträgt 149,7 dBc/Hz.

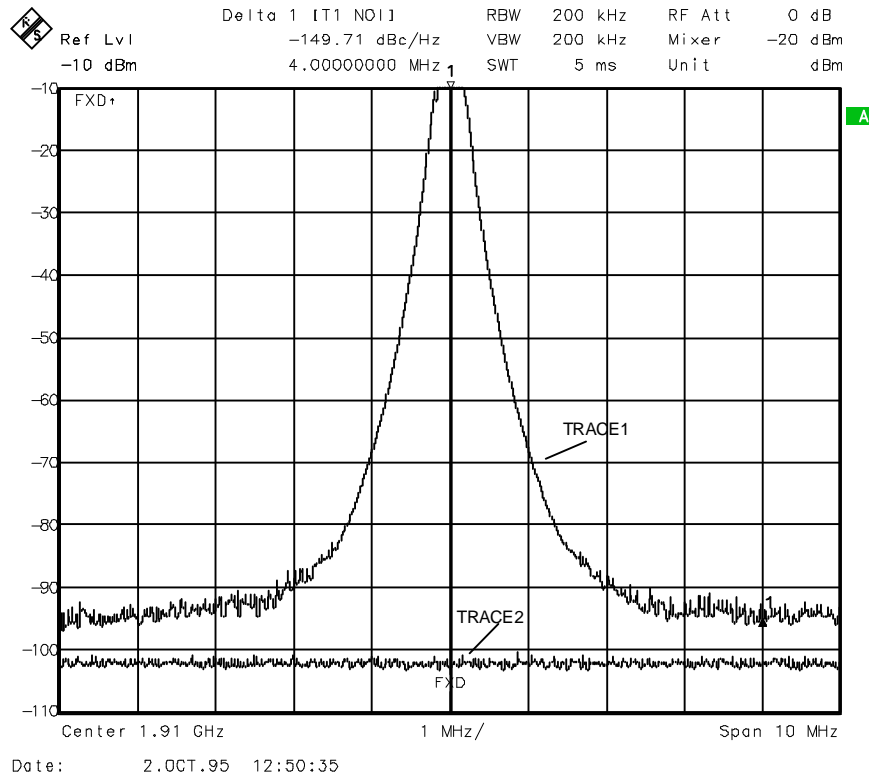


BILD 4 Phasenrauschmessung mit dem FSEA30. Aufgrund der Übersteuerungsfähigkeit des HF-Eingangs wird ausreichend Meßdynamik erzielt.

Einfluß des Eigenrauschens auf das Meßergebnis

Das Phasenrauschen der FSE-internen Umsetz-
oszillatoren und das thermische Eigenrauschen
beeinflusst das Meßergebnis, wenn der Abstand
des Phasenrauschens vom Meßobjekt zum inter-
nen Rauschen nicht mindestens 10 dB beträgt.
Zu beachten ist, daß nicht das Phasenrauschen
des Meßobjekts allein angezeigt wird, sondern
die Summe aus der Leistung des
Phasenrauschens der internen Oszillatoren, des
thermischen Rauschens und der Leistung des
Phasenrauschens vom Meßobjekts. So wird zum
Beispiel der Phasenrauschabstand um 3 dB zu
gering angezeigt, wenn die internen Oszillatoren
und das Meßobjekt den gleichen
Phasenrauschabstand haben.

Anhand der folgenden Korrekturkurve kann der
tatsächliche Phasenrauschabstand einer Quelle
abhängig vom angezeigten Rauschabstand und
dem Eigenrauschabstand des FSE ermittelt
werden.

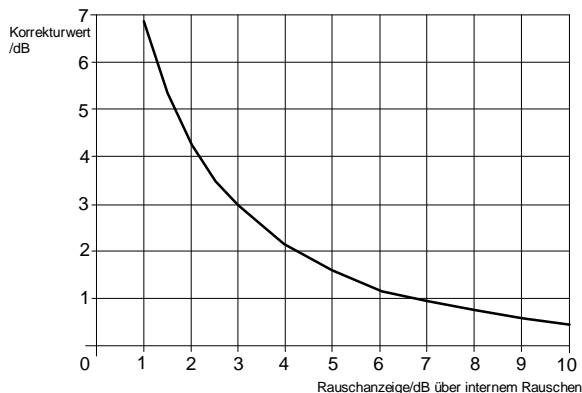


BILD 5 Diagramm zur Korrektur des Einseiten-
band-Rauschabstandes abhängig vom
Signal-Rauschabstand

Auf der Abszisse des Diagramms ist die Rausch-
erhöhung gegenüber dem internen Rauschen
aufgetragen. Dies ist gleichbedeutend mit der
Reduktion des Rauschabstandes gegenüber dem
Eigenrauschabstand des FSE. Auf der Ordinate
ist der Korrekturwert aufgetragen, der zum
gemessenen Rauschabstand zu addieren ist, um
den tatsächlichen Rauschabstand zu erhalten.

1. Aus BILD 4 ist ein Abstand zwischen gemes-
senem Phasenrauschen des Oszillators und
thermischem Rauschen des FSE von ca.
8 dB zu entnehmen. Aus BILD 5 kann dazu
ein Korrekturwert von 0,8 dB entnommen
werden. Der korrigierte Einseitenband-
Rauschabstand beträgt damit $(149,7 + 0,8$
 $\text{dB}) = 150,3 \text{ dB}$
2. Der Eigenrauschabstand des FSE ist bei
1 MHz Abstand vom Träger 140 dBc/Hz. Der
Meßwert an einem Synthesizer betrage
138 dBc/Hz. Der tatsächliche Rauschabstand
beträgt mit dem Korrekturwert 4,3 dB aus
BILD 5 $-142,3 \text{ dBc/Hz}$.

Josef Wolf, 1ES2
Rohde & Schwarz
02.10.1995

Beispiele: