

Werner Schnorrenberg*)

Rauschmessung mit dem Spektrumanalysator

1. Rauschen

Rauschen (Random Noise) wird durch thermische Elektronenbewegung hervorgerufen und ist ein statistisch schwankendes Signal, dessen Pegel proportional zur Empfängerbandbreite ansteigt. Weißes Rauschen (Random Noise) wird deswegen als Leistung/Bandbreite (in dBm/Hz) angegeben.

Rauschen (P_R) ist abhängig von der Temperatur (T) und von der Bandbreite (B). Der theoretische Grenzwert beträgt:

$$P_R = K \cdot T_O \cdot B = -174 \text{ dBm/Hz}$$

$$K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws}$$

$$T_O = 290 \text{ K}$$

$$B = 1 \text{ Hz}$$

Bei konstanter Temperatur ist die Rauschleistung direkt proportional zur Systembandbreite

$$P_R \sim B.$$

Ein Erhöhen der Auflösebandbreite des Spektrumanalysators zum Beispiel um den Faktor 10 bedeutet ein Anwachsen des Grundrauschens um 10 dB.

Die Bestimmung des mittleren Rauschpegels ist oft schwierig, da die statistischen Schwankungen auf dem Bildschirm als ein iter "Rauschteppich" dargestellt werden. Der mittlere Rauschpegel läßt sich durch Einschaltung des Videofilters oder mit Hilfe des Digitalspeichers in der Betriebsart "Average" ermitteln (Bild 1).

Für genaue Ergebnisse muß der so ermittelte Rauschpegel allerdings noch korrigiert werden:

Korrekturfaktoren bei Rauschmessungen

- Rauschbandbreite

Zur genauen Ermittlung der Rauschleistung muß die effektiv wirksame Bandbreite des Auflösungsfilters ermittelt werden. Diese entspricht nicht der im Datenblatt angegebenen Auflösungsbandbreite (-3 oder -6 dB Wert), sondern der Bandbreite eines idealen Rechteckfilters äquivalenter Fläche (Bild 2).

Die Rauschbandbreite üblicher Gaußförmiger Filter entspricht etwa dem 1,2-fachen der -3-dB-Bandbreite und ist in etwa identisch mit der -6-dB-Bandbreite. (Herstellerangaben beachten!)

$$B_{\text{Rausch}} \approx B_{-3 \text{ dB}} \cdot 1,2$$

$$B_{\text{Rausch}} \approx B_{-6 \text{ dB}}$$

Für sehr genaue Messungen sollte das verwendete Auflösungsfilter in linearer Darstellung am Schirmbild des SA's dargestellt und die Fläche grafisch ausgemessen werden.

Log. Verstärker und Demodulator

Weitere Fehler bei Rauschmessungen entstehen durch die Spitzenwertgleichrichtung des Detektors und durch die logarithmische Verstärkung.

Log. Verstärker

Die log. ZF-Verstärker haben die Eigenschaft, große Signale weniger zu verstärken als kleine. Der Effektivwert des Rauschens wird hierdurch zu klein gegenüber seinem wahren Wert angezeigt (Bild 3).

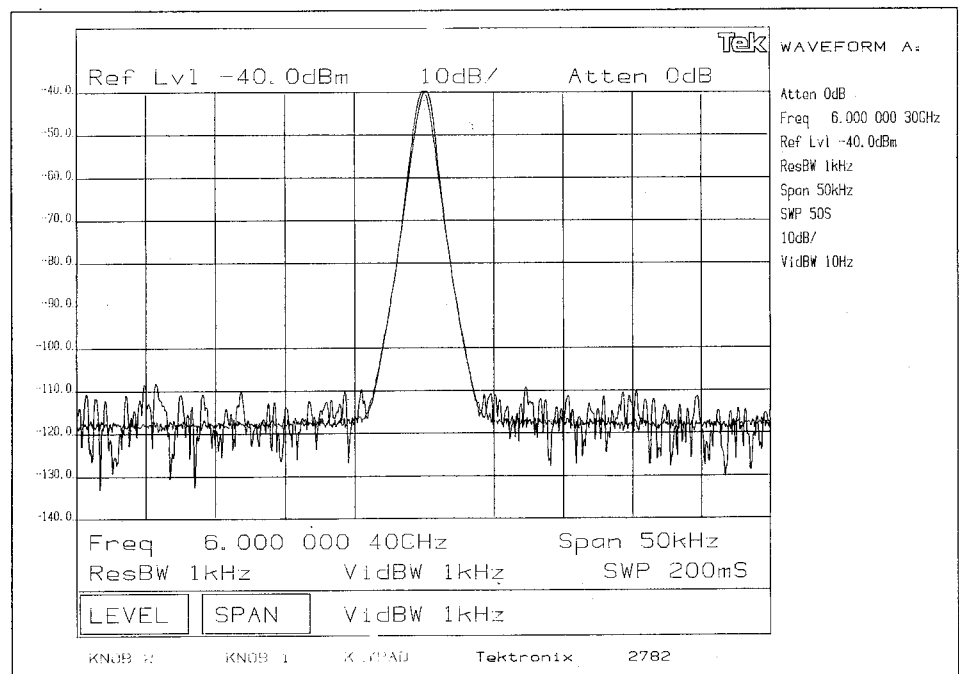


Bild 1: Mittwertbildung des Rauschens durch Videofilterung

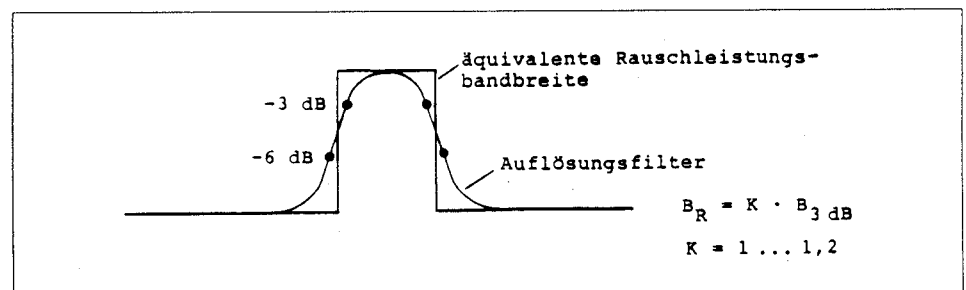


Bild 2: Äquivalente Rauschbandbreite

*) Tektronix GmbH

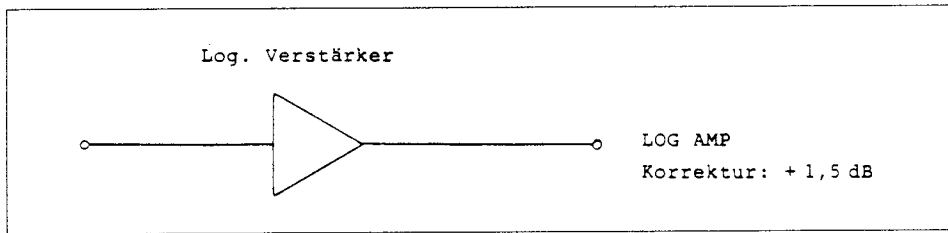


Bild 3: Korrektur Log. Verstärker

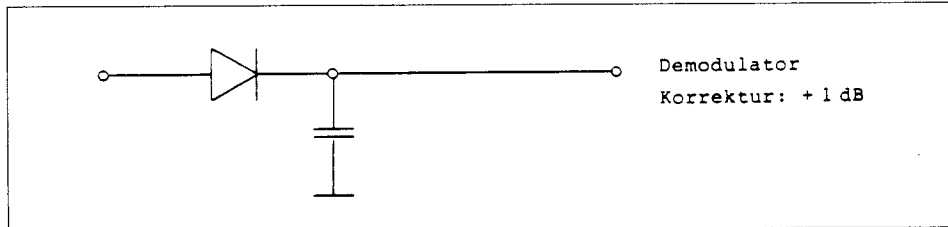


Bild 4: Korrektur Hüllkurvengleichrichter

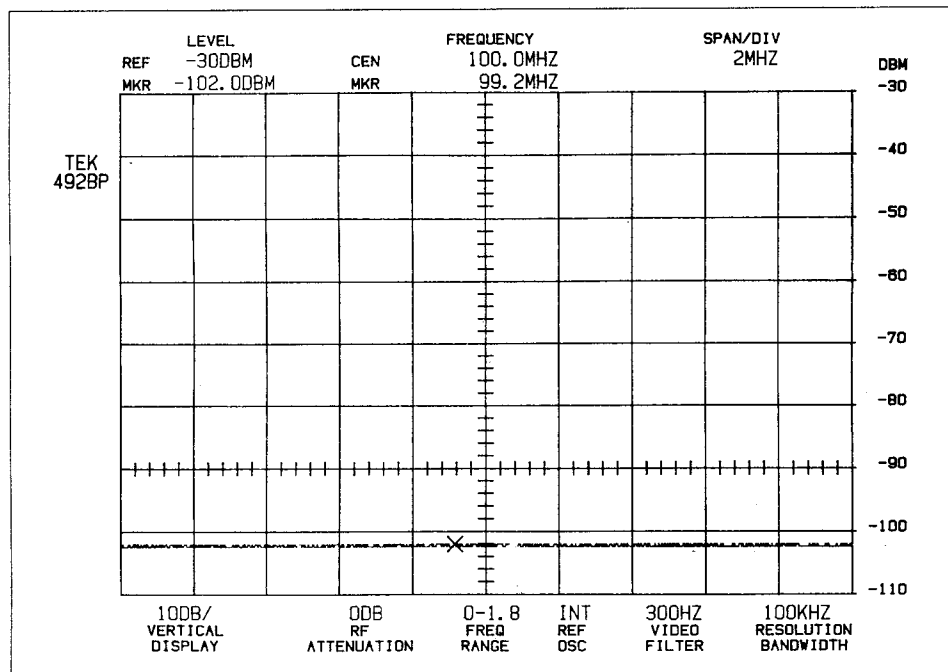


Bild 5: Messung der Rauschamplitude

Demodulator

Üblicherweise werden Spitzenwertgleichrichter zur Demodulation der ZF-Signale verwendet. Diese Gleichrichter liefern bei Rauschen eine Anzeige, die 12,8 % (1,05 dB) unter dem tatsächlichen Effektivwert liegt. Zusammenfassung: Alle gemessenen Rauschwerte müssen um 2,5 dB erhöht werden, was einer Fehlerkorrektur von log. Verstärkung und Spitzenwertgleichrichtung entspricht.

Beispiel: Grundrauschmessung eines Analysators

$B_r \approx$ Auflösungsbandbreite (B_{-60dB}) = 100 kHz

$P = -102 \text{ dBm} / 100 \text{ kHz}$
 $P \text{ tatsächlich} = P_r + 10 \lg (\text{Rauschbandbreite/Auflösungsbandbreite}) + 2,5 \text{ dB}$

$= -102 \text{ dBm} + (0) + 2,5 \text{ dB}$
 $= -99,5 \text{ dBm} / 100 \text{ kHz}$
 $= -149,5 \text{ dBm} / \text{Hz}$

1.1 Messung des Signal-/Rauschabstandes (S/N)

Ist ein Signal vorhanden, so interessiert der Signal/Rausch-Abstand (S/N). Da der Rauschpegel bandbreitenabhängig ist, muß bei der Messung mit dem Spektralanalysator eine Umrechnung der Filterbandbreite auf die Systembandbreite (z. B. 3 kHz bei

Einseitenbandmodulation, 20 kHz bei FM-Sprechfunk, 5,5 MHz beim Fernsehsignal) erfolgen.

$S/N = S/N_{\text{Meßwert}} + 10 \lg (\text{Auflösungsbandbreite/Systembandbreite})$.

Im Bild 5-6 wird das S/N-Verhältnis eines AM-Senders (ohne Modulation), der über eine Systembandbreite von 40 kHz verfügen soll, mit einer Auflösungsbandbreite von 1 kHz (-6 dB) gemessen.

Der S/N-Meßwert beträgt 58,8 dBc/KHz (dBc = dB off carrier) bezogen auf die Systembandbreite von 40 kHz reduziert sich der S/N auf einen Wert von

$S/N = 58,8 \text{ dBc} + 10 \lg (1 \text{ kHz}/40 \text{ kHz}) = 42 \text{ dBc}/40 \text{ kHz}$.

Nach Korrektur der Fehler durch log. Verstärker und Demodulator ergibt sich S/N

$S/N = 42 \text{ dBc}/40 \text{ kHz} - 2,5 \text{ dB} = 39,5 \text{ dBc}/40 \text{ kHz}$.

Desweiteren muß für fehlerfreie Rauschmessungen darauf geachtet werden, daß das Systemrauschen des zu messenden Signals mindestens 10 dB oberhalb des Analysator-Grundrauschpegels liegt (notfalls Vorverstärker verwenden).

Ist die Differenz kleiner als 10 dB wird resultierend aus der Addition des internen und externen Rauschens ein Rauschpegel angezeigt, der über dem tatsächlichen Wert liegt. In jedem Fall muß eine Korrektur nach der Kurve in Bild 8 durchgeführt werden. In Bild 6 beträgt die Differenz zwischen internem und externem Rauschen 5 dB, d. h. 1,7 dB müssen vom dargestellten Rauschpegel subtrahiert werden. Hiernach erhält man den tatsächlichen S/N zu:

$S/N = 39,5 \text{ dBc}/40 \text{ kHz} + 1,7 \text{ dB} = 41,2 \text{ dBc}/40 \text{ kHz}$

und bezogen (normiert) auf 1 Hz-Bandbreite:

$S/N = 41,2 \text{ dBc}/\text{Hz} + 46 \text{ dB} = 87,2 \text{ dBc}/\text{Hz}$.

Die interne Signalverarbeitung hochwertiger Spektralanalysatoren korrigiert automatisch die Aussagefehler des Demodulators, log. Verstärkers und Auflösungsfilters und bezieht das Meßergebnis direkt auf 1 Hz Bandbreite (Bild 7).

Meßergebnis:

$S/N = 85,9 \text{ dB}/\text{Hz} + 1,7 \text{ dB} = 87,6 \text{ dBc}/\text{Hz}$

1.2 Messung kleiner Signale

Bei Messung kleiner Signalpegel, die in der Nähe des Grundrauschens liegen, kann es zu Meßfehlern kommen. Signale bis etwa 10 dB über dem Rauschen werden mit zu hoher Amplitude angezeigt (Bild 8). Der Grund

liegt in der Addition von Rausch- und Signalpegel ($S + N$), dessen Wert über dem tatsächlichen Signalpegel (S) liegt. D. h. ein Signal, das 3 dB über dem Rauschen liegt, hat z. B. die gleiche Amplitude wie das Rauschen.

Beispiel:

Die Amplitude des Signals in Bild 9 wird zu -92 dBm gemessen. Das Signal liegt 3 dB über der Rauschamplitude des Analysators und wird demnach um 3 dB (s. Bild 8) zu hoch angezeigt. Die tatsächliche Amplitude beträgt:

$$A = -92 \text{ dBm} - 3 \text{ dB} = -95 \text{ dBm}$$

1.3 Phasenrauschen

Kein elektronisches Bauelement ist frei von stochastischem Rauschen (Random Noise). Jeder Oszillator endlicher Güte und Bandbreite erzeugt durch Rauschen Frequenzabweichungen, welche die Phasencharakteristik des Oszillators beeinflussen. Bei guten Oszillatoren sind diese Abweichungen sehr gering und verhalten sich zur Stör-FM (Jitter, Kurzzeitstabilität) etwa so, wie diese zur Drift. Im Frequenzbereich wird Phasenrauschen als Rauschseitenbänder rechts und links vom Träger sichtbar (Bild 10).

Neben Phasenrauschen wirkt sich auch Amplitudenrauschen auf eine Verbreiterung des Signals aus. Im Trägerabstand von bis zu einigen 100 kHz besteht das Seitenbandrauschen jedoch praktisch ausschließlich aus Phasenrauschen.

Geringes Phasenrauschen weisen Oszillatoren mit hoher Schwingkreisgüte (Q) auf, z. B. Quarzoszillatoren oder freischwingende LC-Oszillatoren.

Phasensynchronisierte Oszillatoren (Synthesizer) weisen den Vorteil hoher Frequenzgenauigkeit und -Stabilität auf, besitzen jedoch häufig ein so hohes Phasenrauschen, daß sie als Überlagerungsozillator hochwertiger Empfänger völlig unbrauchbar sind.

Eine weitere Quelle starken Seitenbandrauschens kann durch Vervielfachung (n) von Oszillatorfrequenzen ($f_0 \cdot n$) entstehen. Hierbei ist zu beachten, daß das Phasenrauschen des mit n multiplizierten Oszillatorsignals um das Maß 20 Logn ansteigt!

1.4 Messung des Seitenbandrauschens

Neben Stabilität und spektraler Reinheit (Nebenwellen, Oberwellen) ist das Seitenbandrauschen als Qualitätskriterium von Oszillatoren in den letzten Jahren immer mehr in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit gerückt. Das Seitenbandrauschen (SBN = Sideband Noise) wurde zur Schlüsselinfor-

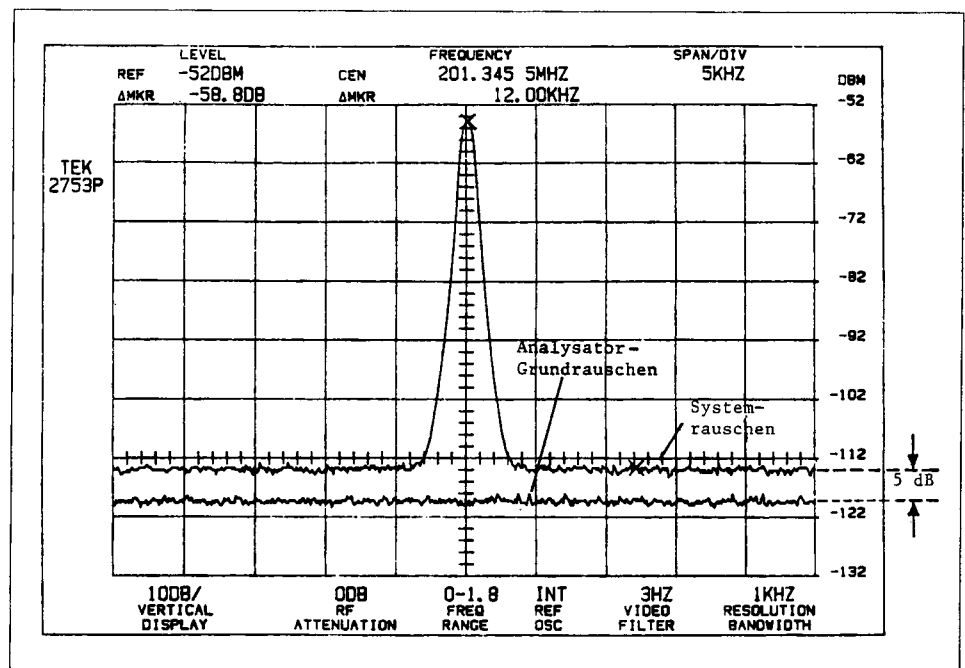


Bild 6: Messung des S/N mit Delta-Marken

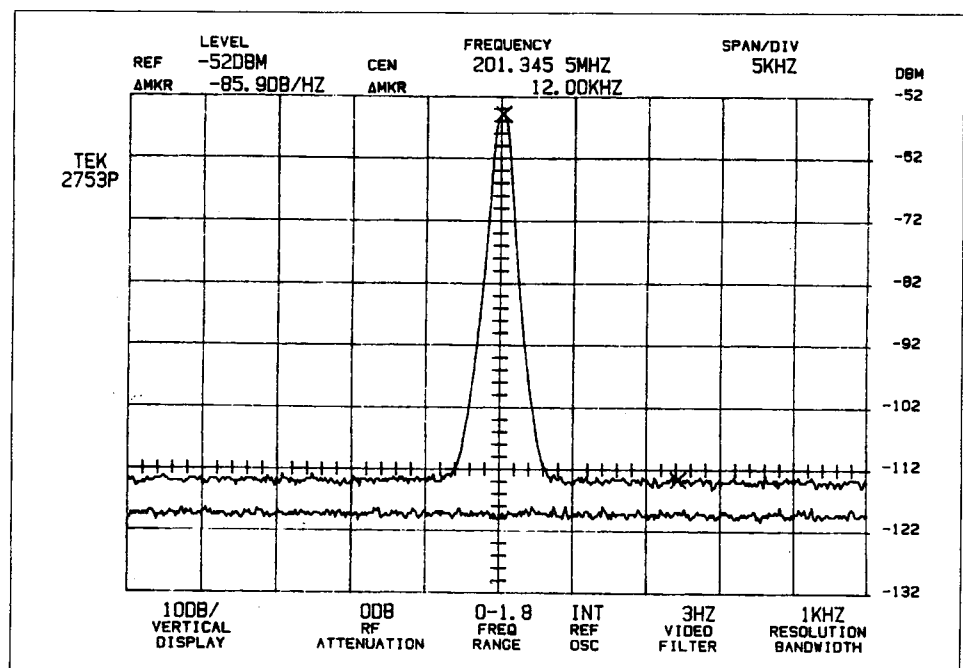


Bild 7: Gleiches Signal wie in Bild 6, aber mit automatischer Rauschnormierung auf 1 Hz Bandbreite

mation von Signalquellen und muß somit meßtechnisch erfaßt werden.

Die Rauschamplituden auf beiden Seiten des Trägers entstehen durch die Phasenmodulation des Trägers mit Random Noise Signalen. Deswegen wird SBN ebenso wie Random Noise in Leistung/Bandbreite (dBm/Hz) gemessen, wobei die SBN-Werte nicht konstant über dem Frequenzbereich verteilt sind, sondern vom Träger ausgehend mit ca.

9 dB/Oktave abfallen.

Es muß also definiert werden, in welchem Frequenzabstand (Offset) vom Träger die Messung durchgeführt wird. Modulationsseitenbänder (wie AM, FM) werden - im Gegensatz zu Rauschen - relativ in Bezug zum Trägerpegel in dBc gemessen. Resultierend aus diesen Betrachtungen wird Seitenbandrauschen - ähnlich wie der S/N - in Einheiten von dBc/Hz ausgehend vom Trä-

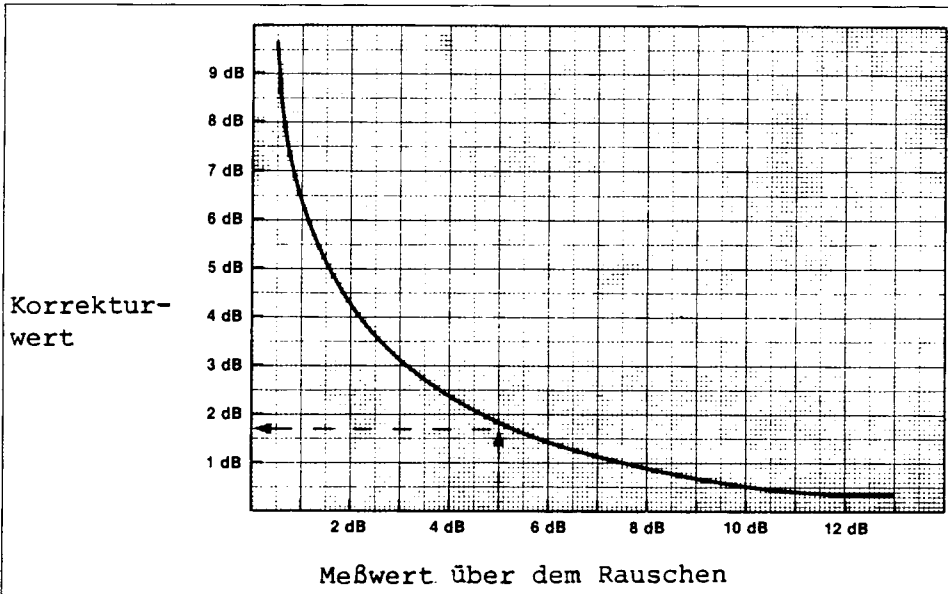


Bild 8: Amplitudenkorrektur für Signale im Bereich von bis zu 10 dB oberhalb des Analysatorrauschens

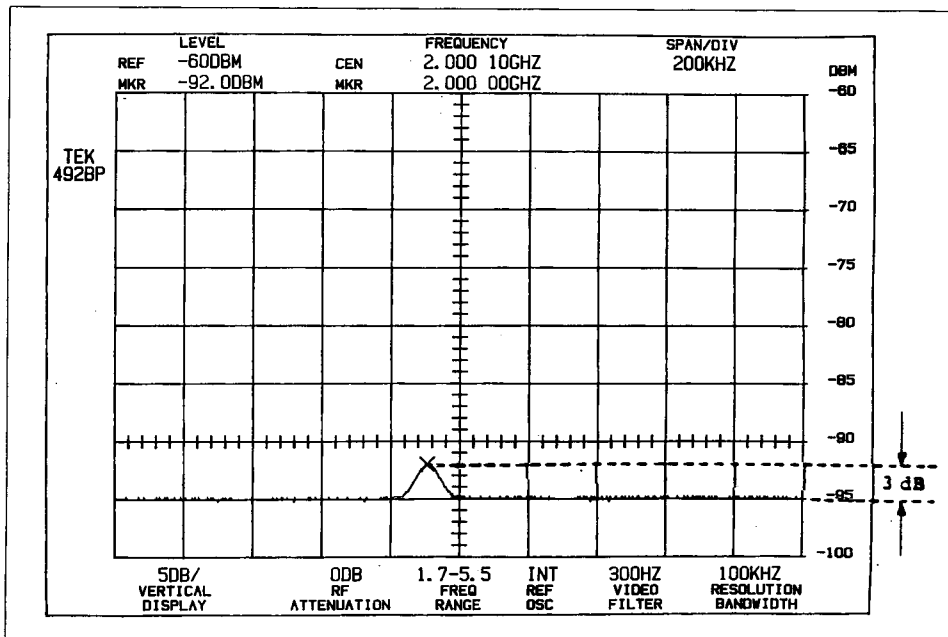


Bild 9: Die Amplitude kleiner Signale ($S/N < 10$ dB) muß korrigiert werden. Der Meßfehler beträgt i. a. Beispiel 3 dB

ger, in einem definierten Abstand zu diesem gemessen.

Die meisten Oszillatoren erzeugen Seitenbandrauschpegel von -70 bis -110 dBc/Hz in einem Trägerabstand von 10 kHz. Beste Oszillatoren, wie Referenzoszillatoren im Bereich von 10 bis 100 MHz, erzeugen Seitenbandrauschpegel von <-160 dBc/Hz in 10 kHz Offset. Oszillatoren mit mäßiger Stabilität oder sehr hochfrequente Oszillatoren können auch schlechte Werte von nur -40 dBc in 10 kHz Offset aufweisen.

1.4.1 Indirekte Methode

Sehr rauscharme Oszillatoren können nur indirekt gemessen werden. Das Prinzip der Messung beruht auf der Unterdrückung des Trägers, Ausfilterung des Seitenbandrauschens, Messung der effektiven Rauschspannung und Vergleich mit dem Trägerpegel (Bild 11).

Der Referenzoszillator und der zu testende Oszillator besitzen die gleiche Frequenz und werden in einem Balance-Modulator (Ringmischer) auf die Frequenz Null gemischt. Das Mischprodukt steuert eine PLL-Schleife, die den Referenzoszillator phasenstarr an den zu untersuchenden Oszillator anbindet. Für die Phasenregelschleife ist eine große Zeitkonstante zu wählen, so daß nur sehr langsame Frequenzänderungen (Drift) ausgeregelt werden. Die schnellen Phasenänderungen (Phasenrauschen) können mit einem empfindlichen, rauscharmen und hochselektiven Spektrumanalysator für niedrige Frequenzen untersucht werden (Bild 12). Für korrekte Messungen muß in jedem Fall gewährleistet sein, daß die Rauschseitenbänder des Ref. Oszillators und des Spektrumanalysators als Summe kleiner ist als das Rauschen des zu testenden Sign. An Stelle des Spektrumanalysators kann auch ein Effektivmesser mit hohem Crest-Faktor oder ein Oszilloskop verwendet werden. Damit können allerdings nur quantitative Messungen durchgeführt werden, wie z. B. der Vergleich zweier Oszillatoren miteinander.

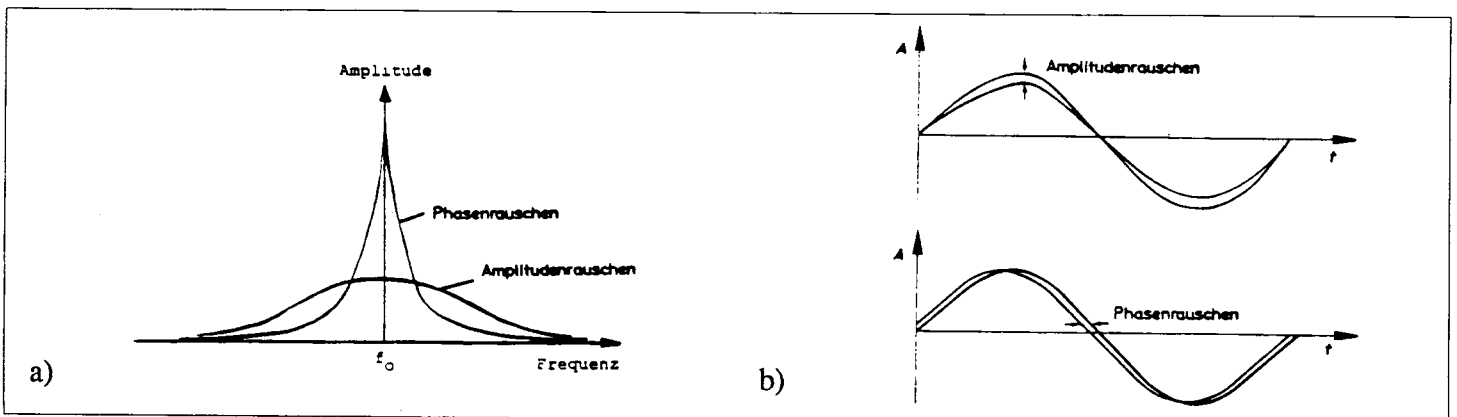


Bild 10: Phasen- und Amplitudenrauschen eines Oszillatorsignals im (a) Frequenz- und (b) Zeitbereich

1.4.2 Direkte Methode

Die direkte Methode der Messung des Seitenbandrauschens gestaltet sich sehr viel einfacher und unempfindlicher gegen Meßfehler als die indirekte. Der zu testende Oszillator wird direkt mit dem Eingang als Spektrumanalysator verbunden und das Seitenband-Phasenrauschen unmittelbar im definierten Abstand zum Träger in dBc/Hz gemessen (Bild 13).

Grundsätzlich muß der für SNB-Messungen geeignete Spektrumanalysator über einen hohen 1-dB-Kompressionspunkt (Großsignalfestigkeit) und über ein hohes Auflösungsvermögen (<10 Hz) verbunden mit hoher Filterflankensteilheit verfügen, so daß sehr nahe an den Träger herangemessen werden kann.

In Trägernähe hängt der dynamische eßbereich neben der Filterflankensteilheit wesentlich von der Reinheit des Lokaloszillators ab (Bild 14). Durch Mischung wird das Phasenrauschen des LO's auf die Meßsignale übertragen. Kleine Signale (kohärente Seitenbänder) in der Nähe des Trägers können dabei, trotz ausreichender Filterselektion, vom Phasenrauschen des LO's zugedeckt werden und kommen nicht zur Anzeige. Das auf dem Bildschirm dargestellte Seitenbandrauschen entspricht dem des internen LO's und nicht dem des zu testenden Signals.

Einfache HF- und Mikrowellen-Analysatoren besitzen ein SBN von ca. -60 dBc/Hz in 10 kHz Abstand, gute Analysatoren -80 dBc/Hz und sehr gute Geräte kleiner -110 dBc/Hz.

Im Mikrowellenbereich stößt die direkte Messung von SBN an eine Grenze, da die 'ischtechnik konventionell aufgebauter krowellen-Analysatoren Oberwellen (n) des 1. LO's verwendet (bis zu $n = 50$). Das Seitenbandrauschen des Analysators verschlechtert sich dabei um den Wert 20 Logn.

Mikrowellenanalysatoren neuester Entwicklung - wie der TEK 2782 - umgehen dieses Problem, indem das Prinzip der Grundwellenmischung ($n = 1$) bis 28 GHz angewendet wird (Bild 15). Der 2782 erreicht durch dieses neue Verfahren erstmalig Seitenbandrauschwerte von -105 dBc/Hz in 10 kHz Offset bei 21 GHz oder -97 dBc/Hz bei 33 GHz und -87 dBc/Hz bei 150 GHz (Bild 16).

Die kleinste Auflösungsbandbreite von 3 Hz ist noch bis 28 GHz anwendbar.

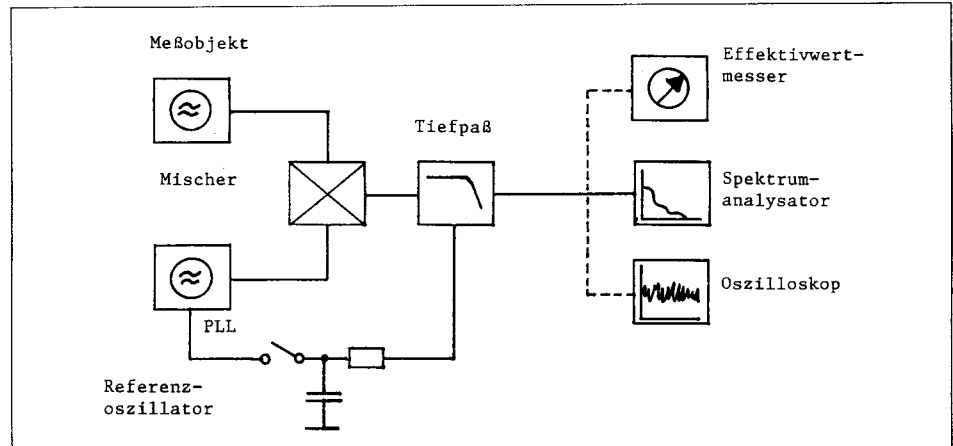


Bild 11: Prinzipaufbau der indirekten Meßmethode von Seitenband-Phasenrauschen

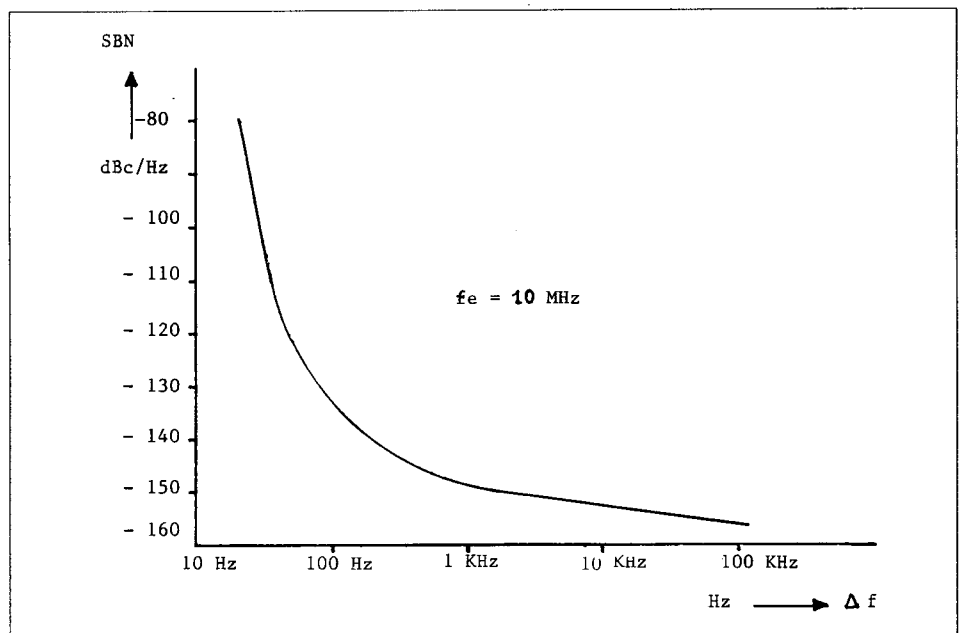


Bild 12: Ermittelte Seitenbandrauschkurve eines guten Oszillators

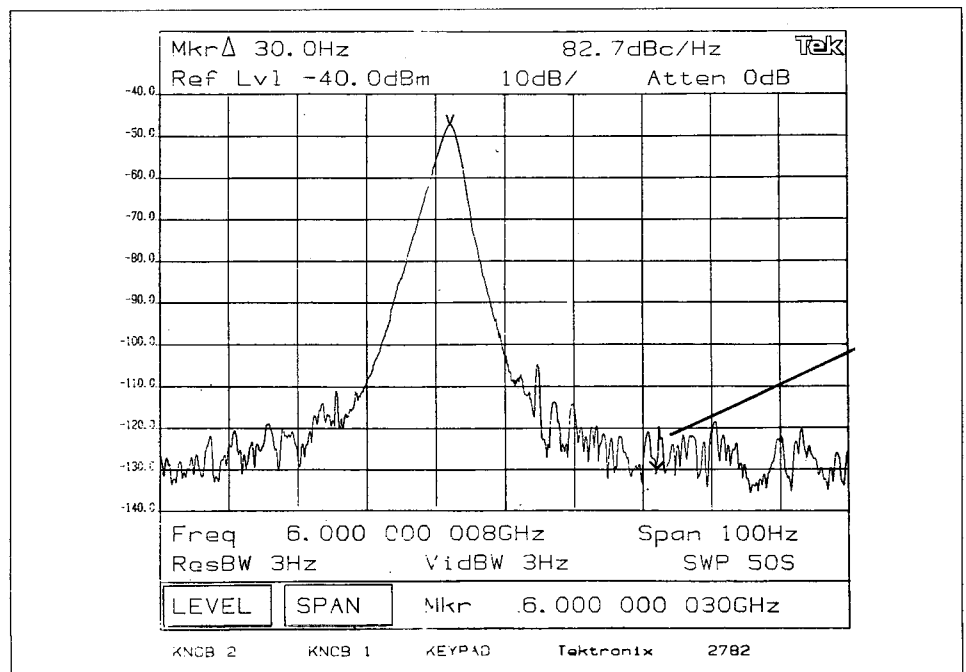


Bild 13: Direkte Messung des Seitenbandrauschens bei 6 GHz in 30 Hz-Offset mit dem Spektrumanalysator Tek 2782

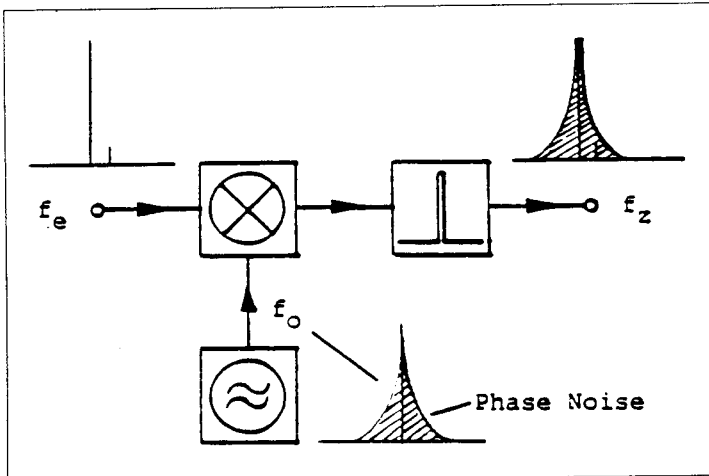


Bild 14: Dynamikreduktion durch Phasenrauschen

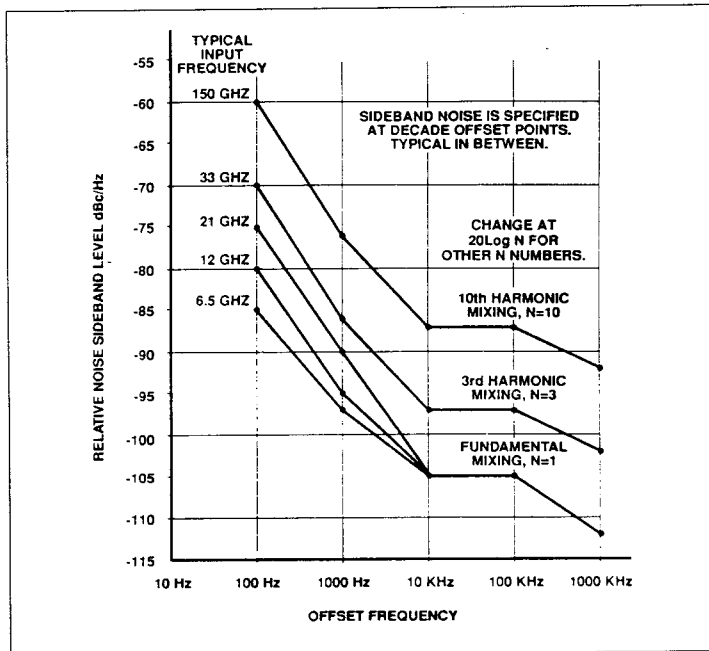


Bild 15: TEK 2782 Spektrumanalysator für den Frequenzbereich von 100 Hz bis 33 GHz (coaxial)

Meßbeispiele:

Im Bild 17 werden die Rauschseitenbänder eines Synthesizer-Generators bei 6 GHz ausgemessen. Die Auflösungsbandbreite des Analysators beträgt 1 kHz, die Videobandbreite 30 Hz und die Sweep Time 50 s. In einem Offset von 10 kHz beträgt das Phasenrauschen des Testsignals -80,5 dBc/Hz. Das Ergebnis beinhaltet bereits die Korrekturen für Rauschbandbreite, log. Verstärker und Hüllkurvenvergleichsrichter.

Wie hoch ist das Seitenbandrauschen des Analysators selbst bei dieser Frequenz? Zur Beantwortung der Frage wurde in Bild 18 zum Vergleich ein zweites, sehr sauberes 6 GHz-Signal angelegt (untere Kurve). Das Seitenbandrauschen dieses Signals liegt in 10 kHz Abstand um mehr als 25 dB tiefer, bei -106,3 dBc/Hz. Dies dürfte der Meßgrenze des Analysators entsprechen, die L₂₁ 21 GHz mit -105 dBm spezifiziert ist. Der Abstand zwischen internem und externem Rauschen ist groß genug, so daß das Meßergebnis gültig ist.

Bei weiterer Auflösung der Signale bis herunter zu 3 Hz Auflösungsbandbreite und 100 Hz Hub im Bild 19, zeigt das Signal des Synthesizers außerdem ein kohärentes Störsignal bei 50 Hz Offset (Netzbrumm?). Das Seitenbandrauschen des Vergleichssignals beträgt 82,7 dBc/Hz in 30 Hz Abstand - was ebenfalls der Meßgrenze des Analysators entsprechen dürfte - das des Testsignals liegt um ca. 25 dB darüber und ist schon ab 10 Hz-Offset meßbar!

Bild 16: Typ. Seitenbandrauschen des TEK 2782

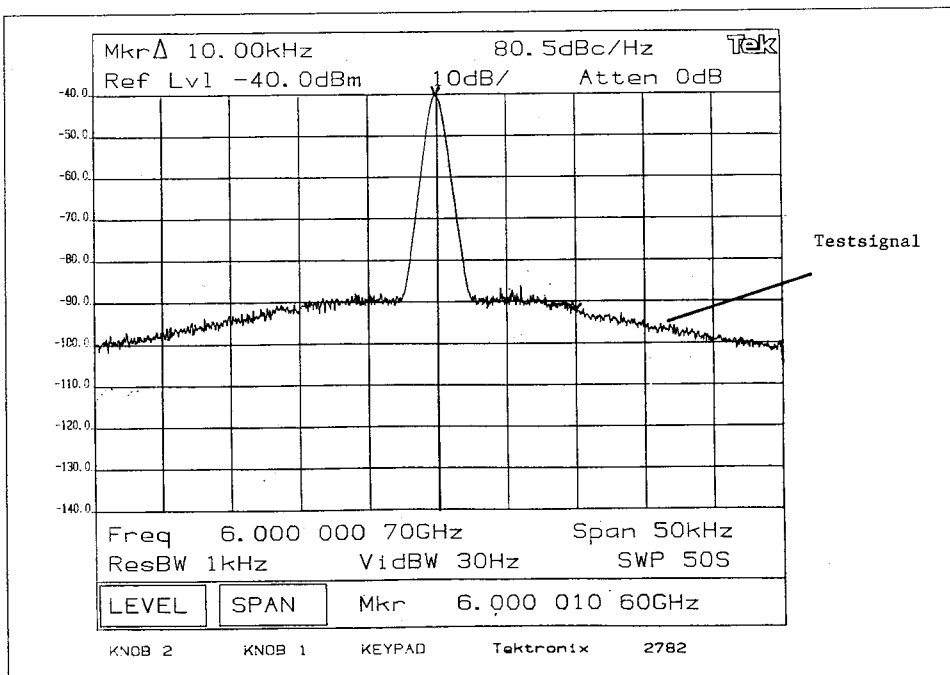


Bild 17: Phasenrausch-Messung bei 6 GHz und 10 kHz-Offset

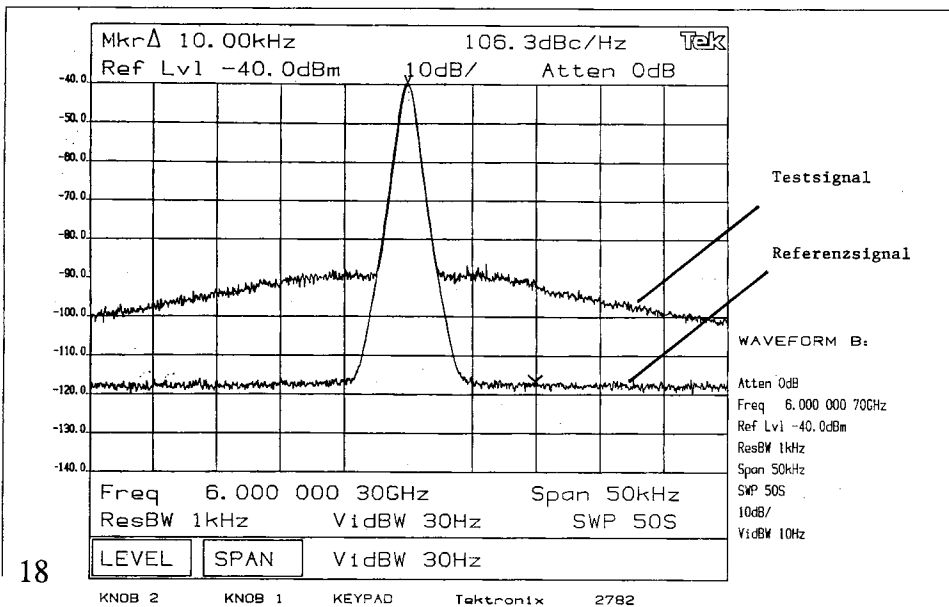
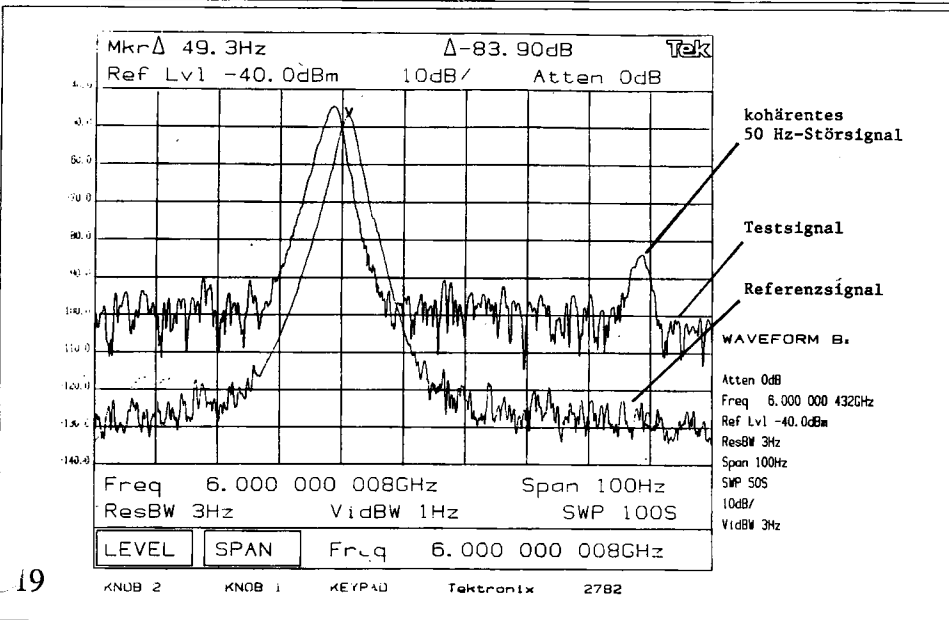


Bild 18: Vergleich verschieden guter Signale bei 6 GHz

Bild 19: Seitenbandrauschen von 6 GHz-Signalen gemessen mit 3 Hz-Auflösebandbreite

Bild 20: Phasenrauschmessung eines 21 GHz-Oszillatorsignals



Im Bild 20 wird ein 21 GHz-Signal gemessen. Der SNB-Pegel in 10 kHz-Offset beträgt -74,6 dBc/Hz. Da für Vergleichszwecke kein besseres Signal zur Verfügung steht, stellt sich die Frage, ob die Messung gültig ist. Laut Spezifikation (Bild 16) beträgt das SBN des TEK 2782 bei dieser Frequenz -105 dBc/Hz in 10 kHz Abstand vom Träger. Der Unterschied beträgt damit über 30 dB, d. h. die Messung ist gültig.

Hinweis:

Wenn die Differenz zwischen internem und externem Seitenbandrauschen < 10 dB ist, muß der Meßwert entsprechend der Kurve in Bild 8 korrigiert werden.

Literaturverzeichnis:

TEKTRONIX: Sideband Noise Measurements; Application Note, 26W-7047, Morris Engelson

TEKTRONIX: Random Noise Measurements; Application Note, 26W-7045, Morris Engelson

TEKTRONIX: Spektrum Analyzer Fundamentals, Application Note, 26W-7037

TEKTRONIX: Pulsed Signal Analysis Application Note, 26W-7044

Schnorrenberg, W.: Spektrumanalyse, Vogel Fachbuch, Meßtechnik, 219 Seiten, ISBN 3-8023-0290-7

Schnorrenberg, W.: Theorie und Praxis der Spektrumanalyse, Seminarunterlagen, Tektronix GmbH 1988/89

Schnorrenberg, W.: Messungen mit Spektrumanalysatoren, Lehrgang HF- und Mikrowellenmeßtechnik, TAE-Esslingen, 1986 bis 1989

