

Aufbau und Anwendungen eines Kammgenerators

Funkamateure verwenden Kammgeneratoren in der Regel dafür, die S-Meter Genauigkeit ihrer KW-Empfänger auf allen Bändern zu testen. FUNKAMATEUR brachte dazu vor einiger Zeit einen Bausatz (1, 2) heraus, mit dem von 0-30MHz ein Kamm von 100kHz-Signalen erzeugt wird, die alle über einen Pegel von $S9 = -73\text{dBm} = 50\mu\text{V}$ an 50 Ohm verfügen. Mit anderen Worten, ein kalibrierter Multi-Ton-Generator. Hierbei wird die Frequenz eines $12,8\text{MHz}$ Quarzoszillators auf $f=100\text{kHz}$ geteilt und einem NAND-Gatter zugeführt, das so geschaltet ist, dass nur ein schmaler Impuls des Signals durchgelassen wird (Bild 1). Dieses Pulssignal produziert ein 100kHz -Linienspektrum bis in den GHz-Bereich, wobei die Spektrallinien von 0-30MHz (300 Spektrallinien) alle den gleichen Pegel besitzen und am Ausgang des Kammgenerators als Messsignal von $-73\text{dBm} = S9$ zur Verfügung stehen.

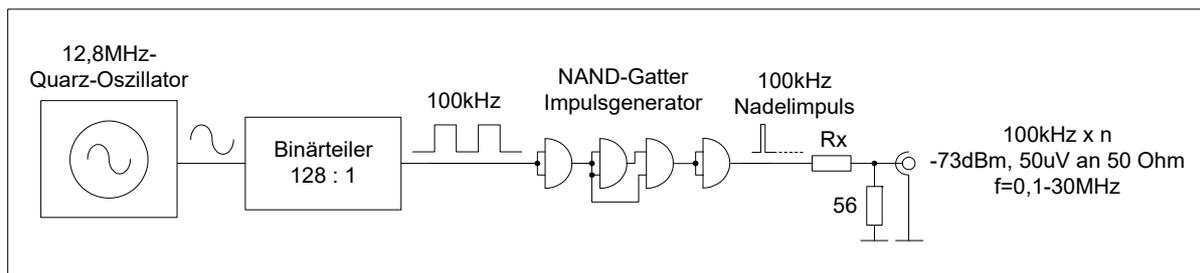


Bild 1: Aufbau des 100kHz-Kammgenerators

Nun stellt sich die Frage, wie es überhaupt möglich ist, mit einem Pulssignal (Rechtecksignal) ein pegelgleiches Spektrum von 100kHz-Signalen über einen größeren Frequenzbereich zu produzieren, wo doch gemäß der Fourier-Analyse alle Linien nach $\sin(x)/x$ abfallen. Wie das funktioniert, versuche ich nachfolgend mit Hilfe eines Funktionsgenerators (SDG6022) für Sinus-, Rechteck- und Puls-Signale zu erläutern.

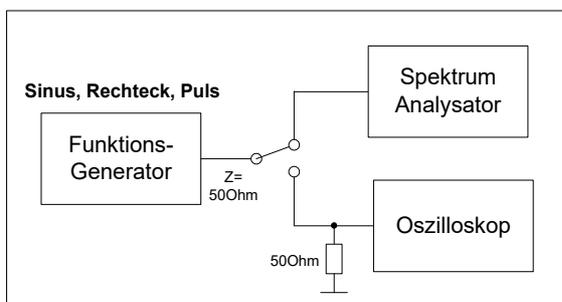


Bild 2: Messung von Sinus-, Rechteck- und Puls-Signalen

Sinussignal

Der Funktionsgenerator erzeugt ein 100kHz -Sinussignal (Bild 2) mit einer Amplitude von $0,4V_{SS}$. Der Effektivwert des Signals beträgt $U_{\text{rms}} = U_{SS}/2\sqrt{2} = 0,4V_{SS}/2\sqrt{2} = 0,141V_{\text{rms}}$ woraus sich eine Leistung an $R=50\Omega$ berechnet von $P = U_{\text{rms}}^2/R = 0,02V_{\text{rms}}^2/50\Omega = 0,0004\text{Watt} = 0,4\text{mW} = -4\text{dBm}$.

Der Analysator (Bild 3) zeigt das Sinussignal als eine einzelne Spektrallinie bei $f=100\text{kHz}$ mit einem Pegel von -4dBm , dargestellt über einen Frequenzbereich (Span) von 0 bis 5MHz . Da es sich um ein sauberes Sinussignal handelt, entstehen keine Oberwellen.

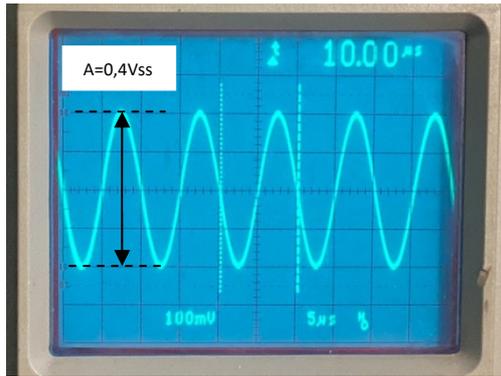


Bild 3: Sinussignal am Scope, U_{ss}=0,4V

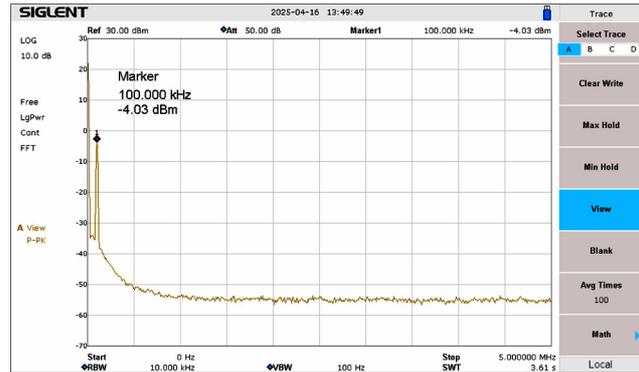


Bild 4: Sinussignal am Spektrumanalysator

Rechtecksignal

Wird aus dem 100kHz-Sinussignal ein symmetrisches Rechtecksignal generiert, zeigt das Scope ein Signal gemäß Bild 4. Das Rechtecksignal besitzt ebenfalls eine Amplitude von 0,4Vs und gemäß $1/T = 1/10\mu s$ eine Grundfrequenz von 100kHz mit einem Tast-Pausen-Verhältnis von $t_0/T = 5\mu s/10\mu s = 1/2$.

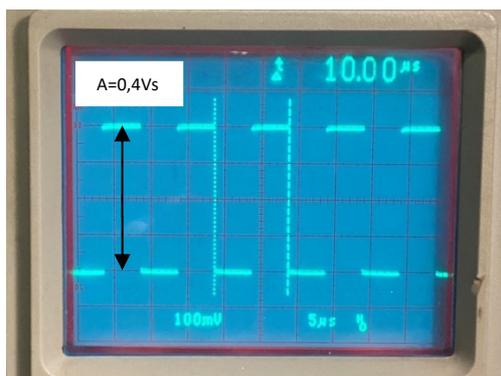


Bild 5: Rechtecksignal am Scope, U_s=0,4V

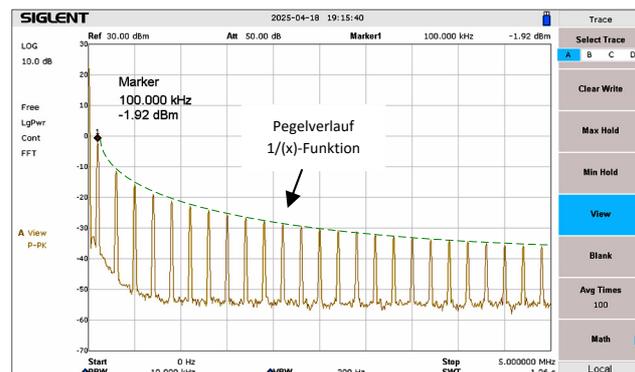


Bild 6: Rechtecksignal am Analysator

Im Gegensatz zu einem Sinussignal, erzeugt das Rechtecksignal sehr viele Oberwellen (theoretisch unendlich viele), die offensichtlich alle zur Generierung des Rechteck-Zeitsignals erforderlich sind (Bild 6). Die 100kHz-Grundfrequenz (1. Harmonische) erscheint im Spektrum als größtes Signal mit einem Pegel von -1,8dBm, alle anderen Spektrallinien fallen in ihrer Amplitude nach einer 1/x-Funktion ab. Weiterhin entstehen im Spektrum nur ungeradzahlige Spektrallinien, bei 100kHz, 300kHz, 500kHz..., geradzahlige Linien bei 200kHz, 400kHz, 600kHz... tauchen nicht auf.

Die Pegelberechnung aller Spektrallinien (C_n) erfolgt über die Fourier-Analyse gemäß der Gleichung

$$C_n = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin(n \pi/2)}{n \pi/2}$$

mit A = Spannung (U_s) des Rechtecksignals und n = Zahl der Harmonischen.

Mit A = 0,4Vs (0 -> +0,4V) und einem $t_0/T = 1/2$ berechnet sich der Pegel der 1. Spektrallinie zu

$$C1 = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin\left(1 \frac{\pi}{2}\right)}{1 \frac{\pi}{2}} = 0,4Vs \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\pi}{2}} = \frac{0,4Vs}{1,57} = 0,255Vs$$

woraus sich ein Effektivwert ergibt von $0,255Vs/\sqrt{2} = 0,18V_{rms} \Rightarrow -1,9dBm$.

Theorie und Praxis stimmt also überein.

Bei der 2. Harmonischen ($f=200kHz$) entsteht keine Spektrallinie. Gemäß Fourier ist das korrekt, denn bei dieser Frequenz wird der Parameter $\sin \pi$ zu null.

$$C2 = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin\left(2 \frac{\pi}{2}\right)}{2 \frac{\pi}{2}} = 0$$

Falls im Spektrum von Bild 7 trotzdem geradzahlige Spektrallinien auftreten (was in der Praxis oft passiert), dann ist das Rechtecksignal im Zeitbereich nicht genau symmetrisch aufgebaut.

Für die 3. Harmonische (Bild 6) berechnet sich ein Pegel von

$$C3 = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin\left(3 \frac{\pi}{2}\right)}{3 \frac{\pi}{2}} = 0,4Vs \frac{-1}{3 \frac{\pi}{2}} = 0,085Vs = 0,06V_{rms} = -11,4dBm$$

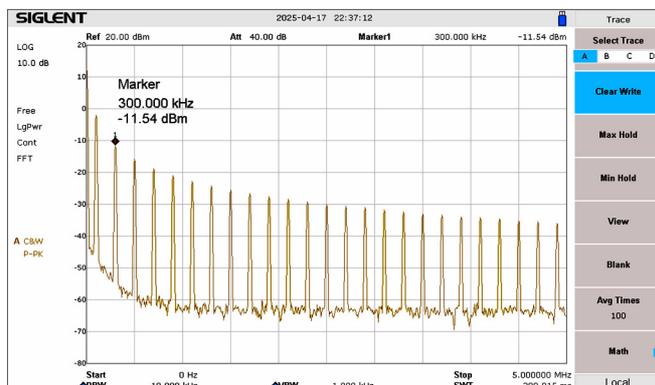


Bild 7: Pegel der 3. Harmonischen, -11,5dBm

Umgekehrt geht's genauso. Steht kein Scope zu Verfügung und man möchte aus dem am Analysator ermittelten Pegel der 100kHz-Linie von -1,9dBm ($0,18V_{rms}$) die Amplitude ($U_s=A$) des Rechtecksignals im Zeitbereich ermitteln, muss die Formel nur umgestellt werden.

$$A = \frac{C1}{\sqrt{2}} \pi = \frac{0,18V_{rms}}{\sqrt{2}} \pi = 0,4Vs$$

Rechtecksignal mit Tastverhältnis von 1:10

Erst bei Verkleinerung des Tast-Pausen-Verhältnisses auf 1/10 (Bild 8) wird die einhüllende Funktion von $\sin(x)/x$ deutlich sichtbar. Die Nullstellen im Spektrum (Bild 9) liegen bei ganzzahlig Vielfachen von 1MHz ($1/t_0$) und die Amplitudenmaxima der Hüllkurven (Keulen) fallen nach der Funktion $1/x$. Die Amplituden der einzelnen Linien werden insgesamt kleiner,

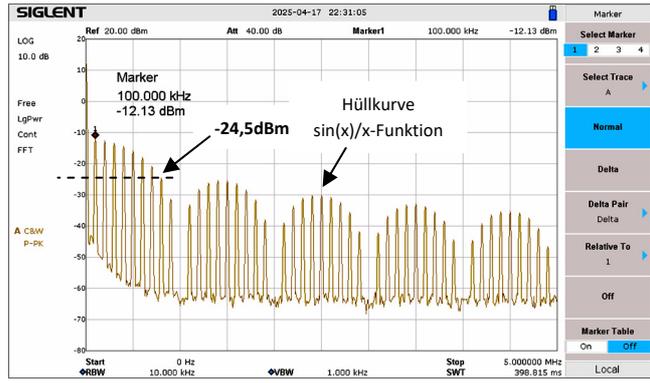
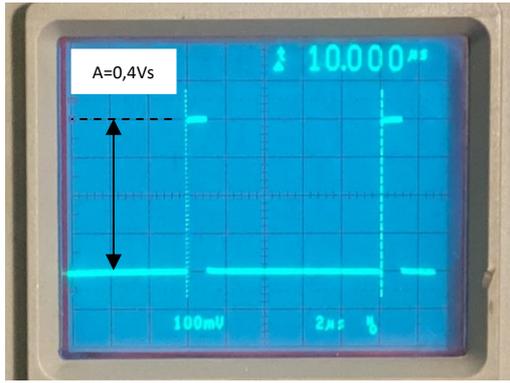


Bild 8: Rechtecksignal $t_0/T=1/10$, $U_s=0,4V$

Bild 9: Spektrum aus Bild 8

da sich die Energie des 2µs Impulses gemäß Fourier auf alle Harmonische verteilt. Die Pegel der Spektrallinien berechnen sich auch hier gemäß zu

$$C = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin(n \pi t/T)}{n \pi t/T}$$

Bei der Grundfrequenz von 100kHz ergibt demnach sich ein Pegel von

$$C_1 = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin\left(\pi \frac{t}{T}\right)}{\pi \frac{t}{T}} = 0.08Vs \frac{\sin(0.309)}{0.314} = 0.077Vs = 0.054V_{rms} = -12.3dBm$$

und z.B. bei der achten Spektrallinie ($n=800kHz$) ein Pegel von

$$C_8 = 2 A \frac{t_0}{T} \frac{\sin\left(8 \pi \frac{t}{T}\right)}{8 \pi \frac{t}{T}} = 0.08Vs \frac{\sin(0.589)}{2.512} = 0.017Vs = 0.0125V_{rms} = -24.5dBm$$

Alle nach Fourier berechneten Pegel stimmen mit den Messwerten des Analysators überein.

Pulssignal

Bei weiterer Verkleinerung der Pulsbreite bis auf 4nS (Bild 10), entsteht im Frequenzbereich

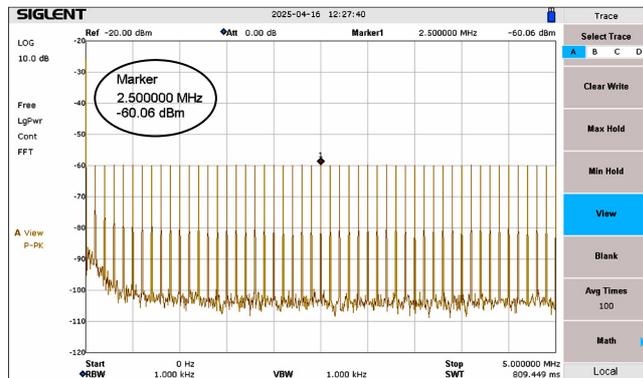
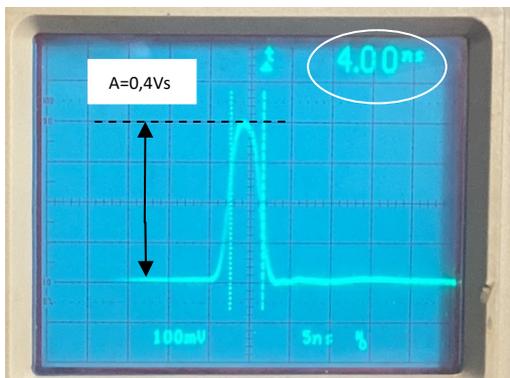


Bild 10: 4nS-Impuls, $U_s=0,4V$

Bild 11: Spektrum von 0-5MHz, $P = -60dBm$

von 0-30MHz ein 100kHz-Linienspektrum, bestehend aus 300 Linien mit jeweils gleichen Pegelgrößen von -60dBm (Bild 11, 12). Erst oberhalb von 30MHz fallen die Pegel der Linien

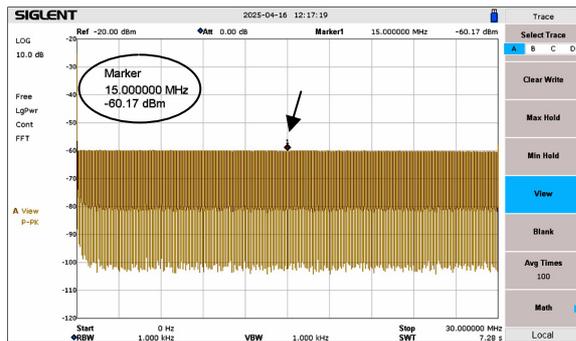


Bild 12: Spektrum von 0-30MHz

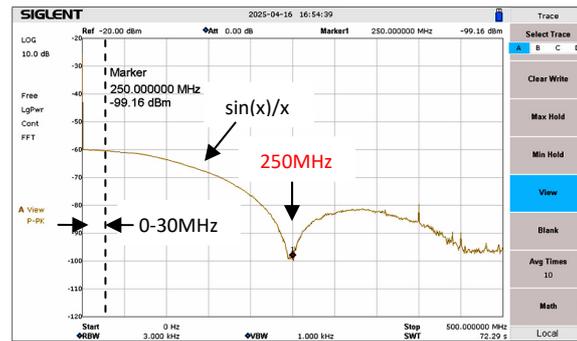


Bild 13: Spektrum von 0-500MHz

gemäß der $\sin(x)/x$ -Funktion ab und erreichen bei $1/t_0 = 1/4nS = 250\text{MHz}$ ihren ersten Nullpunkt (Bild 13). Uns interessiert aber nur der Frequenzbereich von 0 bis 30MHz.

Pegelgenauigkeit

Rein optisch gesehen scheinen die Pegel aller Linien gleich groß zu sein, in Wirklichkeit entsteht aber auch hier ein kleiner Amplitudenabfall, der berechnet werden kann. Der Pegel des 100kHz-Grundsignals beträgt

$$C1 = \frac{2}{\sqrt{2}} A \frac{t_0}{T} \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} = \frac{2}{\sqrt{2}} 0,4V_{rms} \frac{t_0}{T} (1) = 0,0002263V_{rms} \Rightarrow -60\text{dBm}$$

und der Pegel der dreihundertsten Linie bei 30MHz ($C_n=300$)

$$C300 = \frac{2}{\sqrt{2}} A \frac{t_0}{T} \frac{\sin(n \pi t/T)}{n \pi t/T} = \frac{2}{\sqrt{2}} 0,4V_{rms} \frac{\sin(0.377)}{0.377} = 0,000215V_{rms} \Rightarrow -60,34\text{dBm}$$

Kontrolliert man den Unterschied über die Delta-Marker des Analysators (Bild 14), kommt man ebenfalls zu einer Differenz von 0,4dB, die sich für S9-Messungen aber noch verkraften lässt.

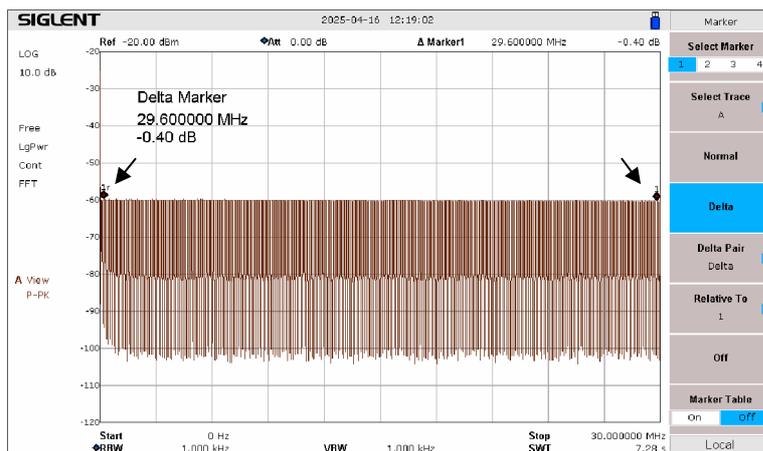


Bild 14: Pegelunterschied von 0,4dB über $\Delta f=29,6\text{MHz}$

Anwendungen des Kammgenerators

S9-Normpegel-Generator zur Kalibrierung von S-Metern

Zur Erzeugung von „S9-Signalen“ im Frequenzbereich von 0,1-30MHz, muss jetzt nur noch ein 13dB-Dämpfungsglied zwischen Generator und Empfänger geschaltet werden (Bild 15), so dass für alle 100kHz ein Signalpegel $-60\text{dBm} - 13\text{dB} = -73\text{dBm} = \text{S9}$ entsteht. Bild 16 zeigt das resultierende „S9-Spektrum“ am Bildschirm eines IC-7300 im 40m-Band.

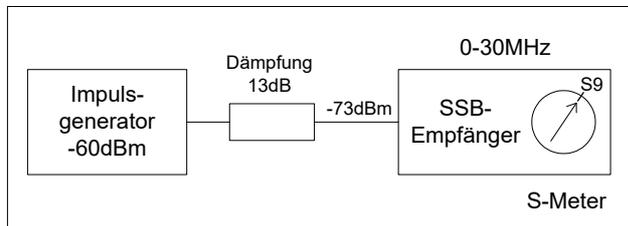


Bild 15: Kammgenerator mit „S9“-Signalen auf alle Bändern

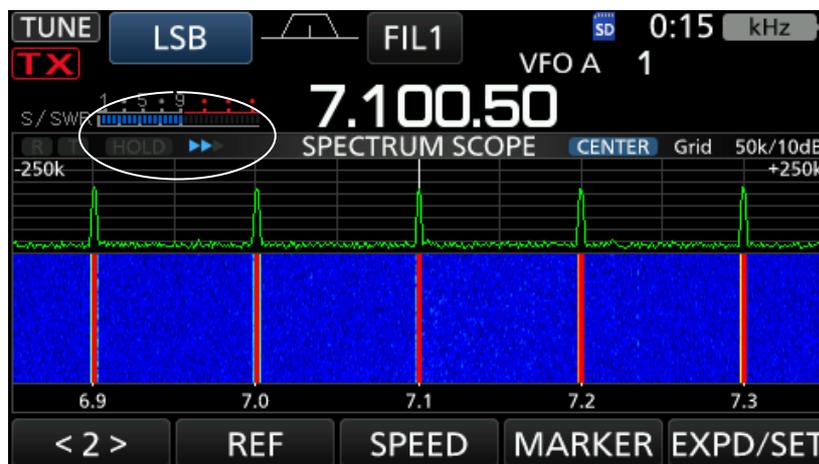


Bild 16: S9-Signale zur S-Meter-Kontrolle im 40m-Band des IC-7300

Übertragungsmessungen

Wird der Span des Analysators auf von 50MHz vergrößert, erscheinen keine einzelnen Linien mehr, sondern eine durchgezogene, horizontale Linie (violette Linie in Bild 17). Der Grund

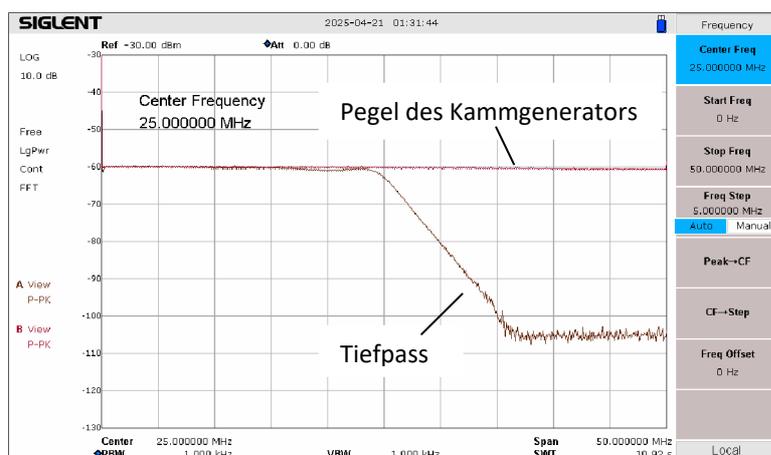


Bild 17: Übertragungsmessung mit Kammgenerator, TP-Filter 25MHz

liegt in der begrenzten digitalen Auflösung des Bildschirms, wodurch die Spitzen der Spektrallinien als eine durchgehende, gerade Linie angezeigt werden, ähnlich der Kurve

eines Tracking-Generators von 0 bis 50MHz (Bild 17). Hierbei gilt: Je kleiner die Auflösungsbandbreite umso höher die Dynamik. Mit 1kHz-RBW beträgt die Messdynamik ca. 45dB, was für einfache Messungen ausreichend sein sollte. Verfügt der verwendete Analysator über keinen Tracking-Generator, könnte dieses Verfahren eine Lösung für Übertragungsmessungen sein!

Hinweis: Bei Wahl der Impulsgröße muss man etwas vorsichtig sein. Mit 0,4Vs Impulsgröße wird der Analysator ohne vorgeschaltete Dämpfung noch nicht übersteuert. Vergrößert man die Spannung jedoch auf z.B. 1Vs, wird der Analysator übersteuert, ohne dass er das meldet! Als Resultat werden die Messungen dann fehlerhaft.

Messung der Empfindlichkeit und Rauschzahl eines Empfängers

Auch solche Messungen sind mit einem kalibrierten Kammgenerator möglich. Zur Messung der Empfindlichkeit, am NF-Ausgang des SSB-Empfängers ein AC-Voltmeter anschließen und das Grundrauschen vom Empfänger über den Lautstärkeregler am Voltmeter auf z.B. 0,1Volt einstellen (Bild 17). Anschließend den Kammgenerator über eine Eichleitung (70dB) mit dem Empfänger verbinden und den Empfänger auf z.B. 14,2MHz (egal welches Band) abgleichen,

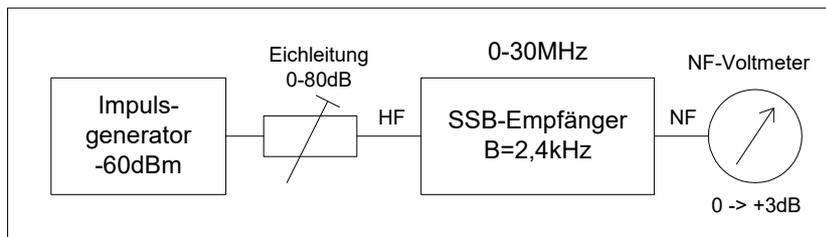


Bild 17: Messung Empfindlichkeit eines Empfängers

so dass ein Überlagerungston von ca. 500Hz zu hören ist. Dann die Dämpfung der Eichleitung so weit vergrößern, bis das NF-Signal am Voltmeter nur noch um Faktor 1,414 ($20\log U_2/U_1 = 3\text{dB}$) ansteigt. Wird hierfür ein Dämpfung von z.B. 67dB benötigt, beträgt die Empfindlichkeit (S) des Empfängers: **$S = -60\text{dBm} + (-67\text{dB Dämpfung}) = -127\text{dBm}/2,4\text{kHz}$** .

Aus der Empfindlichkeit (S) kann die Rauschzahl (NF) des Empfängers berechnet werden. Bezieht man die ermittelte Empfindlichkeit auf die theoretische Rauschbandbreite von 1Hz, erhöht sich die Empfindlichkeit um Faktor 2400 (Bandbreite 2,4kHz) bzw. logarithmisch um den Wert von $10\log 2400 = 34\text{dB}$ auf $S = -127\text{dBm} - 34\text{dB} = -161\text{dBm}/\text{Hz}$. Der Grenzwert der Empfindlichkeit ist bekanntlich -174dBm . Die Differenz beider Werte ergibt das Rauschmaß (Noise Figure, NF) des Empfängers: **$NF = -161\text{dBm}/\text{Hz} - (-174\text{dBm}/\text{Hz}) = 13\text{dB}$** .

Anmerkung: Der S9-Normpegel-Generator von FA ist besser als beschrieben, da er mit einer Pulsbreite von lediglich 1nS arbeitet! Demnach entsteht die erste Nullstelle im Spektrum erst bei 1GHz und der Frequenzkamm mit konstantem Pegel von S9 = -73dBm reicht bis über 50MHz hinaus.

Werner Schnorrenberg
DC4KU
27.04.2025

Literatur

- (1) Einfacher S9-Normpegel-Generator
FA 6/2018

(2) Funkamateurline-Shop

https://www.box73.de/product_info.php?products_id=5080

https://www.box73.de/file_dl/bausaetze/Bauanleitung_BX-099.pdf

