

SWR-Powermeter und PEP-Anzeige

Bei Diskussionen über die Leistung von SSB-Transmittern und Endstufen, tauchen auch häufig Fragen zu PEP-Leistungsmessung auf. "Was ist die PEP-Leistung und wie wird sie gemessen?" oder "Warum soll mein Wattmeter in PEP anzeigen?" bis hin zu "Was zeigt mein Wattmeter überhaupt an, den Spitzenwert, den Mittelwert oder irgendetwas dazwischen?" und die Antworten darauf sind meist sehr unterschiedlich. Obwohl das Thema rund um "PEP-Leistungsmessung" so alt ist, wie es amplitudenmodulierte Sender gibt, ist es anscheinend immer noch aktuell. Nachfolgend soll gezeigt werden, wie man die Messgenauigkeit des eigenen SWR-Meters überprüfen kann und warum ein Wattmeter unter Umständen die PEP-Leistung (Peak-Envelope-Peak) falsch anzeigt.

1.) Leistungsmessung mit einem "1-Ton-Signal" (CW- oder FM-Signal)

Die HF-Ausgangleistung eines SSB-Senders lässt sich sehr einfach mit einem Oszilloskop und/oder Spektrumanalysator messen. Hierzu wird ein NF-Sinussignal von z.B. 1,39kHz in den Mikrofoneingang des Senders eingespeist und die Amplitude des NF-Signals so eingestellt, dass am Senderausgang der jeweils zulässige Maximalwert von z.B. 10 Watt (oder 50 Watt, 200 Watt,...) erreicht wird. Bild 1 zeigt den Messaufbau. Der Senderausgang wird mit einem 40dB-Dämpfungsglied abgeschlossen und daran angeschlossen sind die Messgeräte.

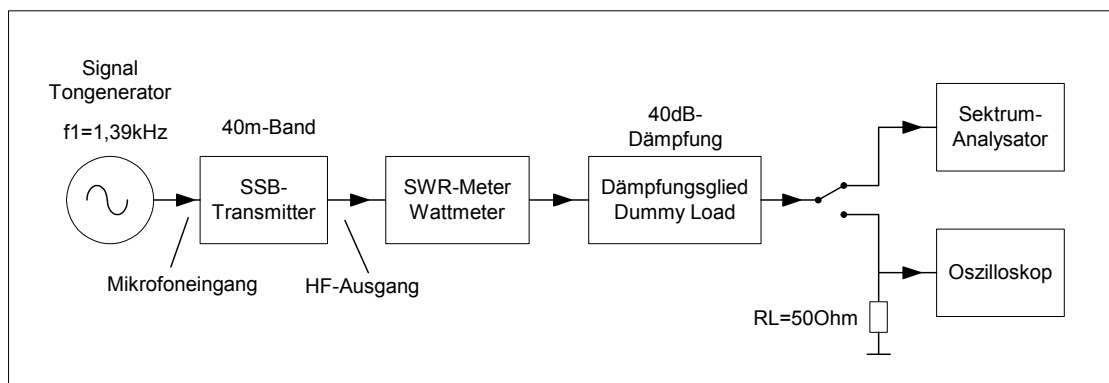


Bild 1: Messaufbau für SSB-Leistungsmessung mit einem "Einzel-Ton"

Als Beispiel soll ein SSB-Sender im 40m-Band mit Hilfe des jeweils verwendeten SWR-Meters auf eine Ausgangsleistung von 10Watt eingestellt werden. Anschließend soll das Messergebnis des SWR-Wattmeters mit Hilfe des Scope und/oder Analysator auf Richtigkeit überprüft werden.

Messergebnis am SWR-Wattmeter:

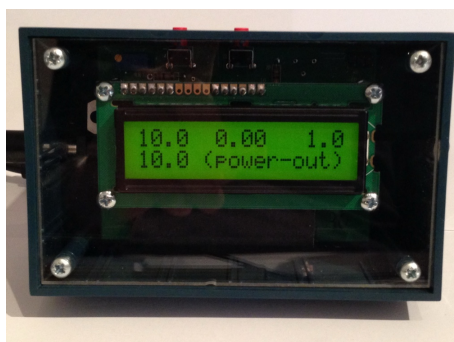


Bild 2: SWR-Meter, Anzeigewert P(PEP)=10Watt, SWR=1.0

Messergebnis am Oszilloskop:

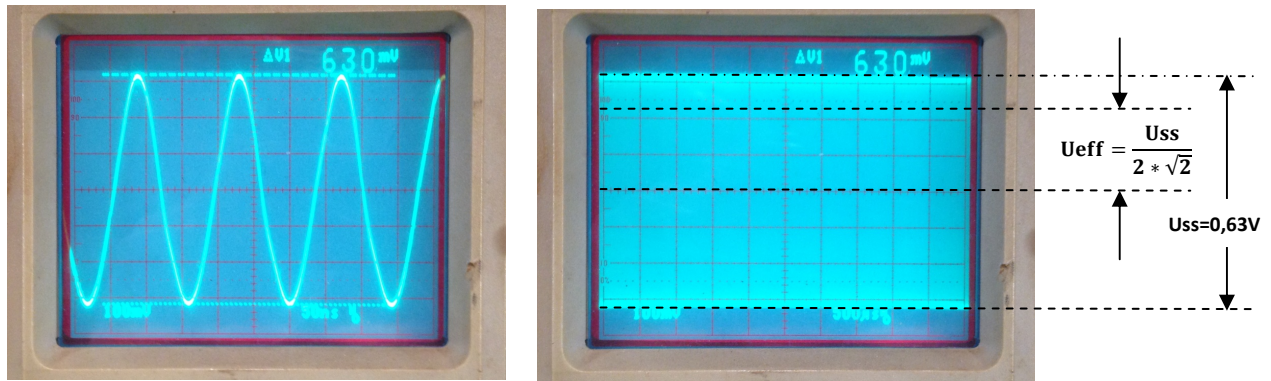


Bild 3: Sender HF-Ausgangsspannung (Uss) bei 1-Ton-Aussteuerung am Oszilloskop, Uss= 630mV (links synchronisiert auf das HF-Signal, rechts freilaufend)

Das Messergebnis am Scope beträgt 630mVss.

Berechnung der Leistung (PEP):

$$U_{ss} (Sender) = U_{ss} (Scope) * 100 (40dB Dämpfung) = 63 \text{ Volt}$$

$$U_{eff} = \frac{U_{ss}}{2 * \sqrt{2}} = 22,3 \text{ Volt}$$

$$P = \frac{U_{eff}^2}{RL} = \frac{497,3}{50} = 10 \text{ Watt}$$

Messergebnis am Spektrumanalysator:

Die gleiche Messung läßt sich ebenso (etwas einfacher und ohne Berechnung) mit einem Spektrumanalysator durchführen. Der Analyzer wird auf eine Mittenfrequenz von 7MHz abgestimmt und die Leistung der dort auftretenden Spektrallinie gemessen. Der Pegel im Maximum der Spektrallinie beträgt 0dBm (1mW).

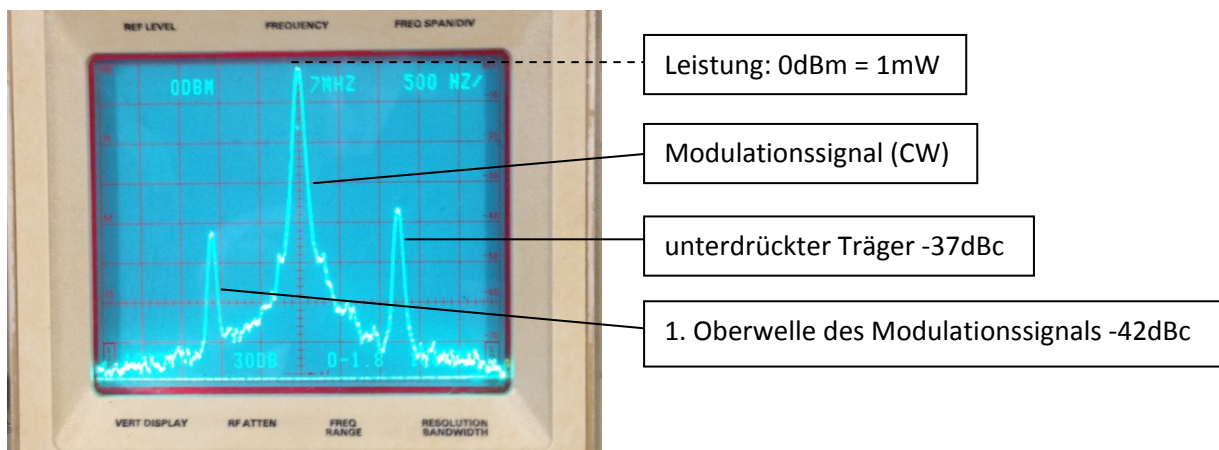


Bild 4: Einton-Leistungsmessung mit einem Sektrumanalysator, USB

Berechnung der Leistung:

$$P(\text{PEP}) = 0\text{dBm} + 40\text{dB (Dämpfung)} = +40\text{dBm} = 10\text{Watt}$$

Aufgrund der hohen spektralen Auflösung, zeigt uns der Analysator noch einige weitere Informationen an. Den unterdrückten Träger mit -37dBc , das gewählte Seitenband (USB) und die erste Oberwelle des Nutzsignals. Diese Messwerte sind für die weitere Betrachtung jedoch ohne Bedeutung.

Ergebnis der durchgeführten 1-Ton-Messung:

Bei der 1-Ton-Messung sind die Ergebnisse auf allen Messgeräten identisch. Alle Instrumente zeigen als mittleren Spitzenwert bzw. PEP-Wert eine Leistung von 10Watt an. Das SWR-Meter/Wattmeter zeigt den korrekten Wert an.

2.) Leistungsmessung mit einem "2-Ton-Signal" (Sprachsignal)

Im nächsten Schritt messen wir die Ausgangsleistung des Senders mit einem 2-Ton-Signal (Mehrtonsignal) und es soll überprüft werden, ob das Wattmeter auch unter diesen Bedingungen den Spitzenwert (PEP) des SSB-Signals korrekt anzeigt. Bei SSB-Sendern wird meistens die Spitzen-Hüllkurvenleistung angegeben. Das ist der Effektivwert der Leistung für den höchsten Punkt der Hüllkurve, bevor der Sender übersteuert.

Die Messung mit einem Doppelton entspricht viel mehr dem praktischen Funkbetrieb, denn die menschliche Stimme besteht ja nicht nur aus einem einzelnen Ton sondern aus einem Gemisch von vielen Frequenzen unterschiedlicher Amplitude. Zur Messung wird der Sender mit einem Zweitonsignal angesteuert und am 50-Ohm-Dummy-Load die Spitzenspannung mit einem Oszilloskop bzw. die Leistung mit einem Spektrumanalysator gemessen. Den Messaufbau zeigt Bild 5. An den Eingang des Sender werden zwei NF-Töne gleichen Pegels angelegt, im Beispiel $f_1=1,39\text{kHz}$ und $f_2=1,85\text{kHz}$, $\Delta f=460\text{Hz}$. Die Signalfrequenzen müssen auf jeden Fall so gewählt werden, dass sie beide ungehindert des SSB ZF-Filter des Senders passieren können.

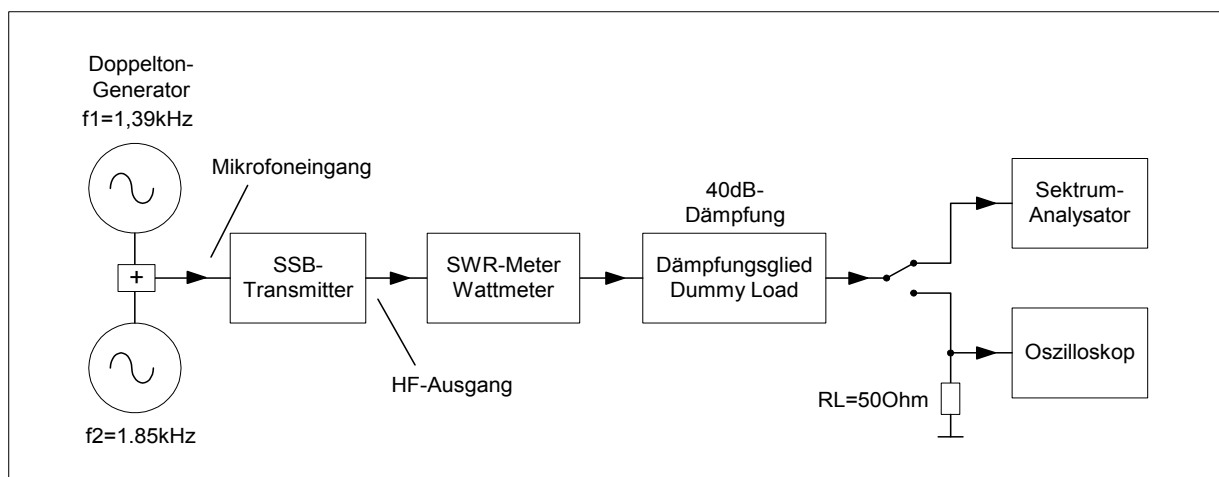


Bild 5: Messung der HF-Ausgangsleistung eines SSB-Sender mit einem Doppel-Ton

Zunächst messen wir die HF-Ausgangsleistung mit dem Oszilloskop.

Messergebnis am Oszilloskop:

Nach Anschluß des Doppelton-Generators wird der Summenpegel langsam soweit reduziert, bis die Spitzen-Sitzen-Spannung der HF-Schwebungs-Hüllkurve am Oszilloskop wieder genau die Spannung von $U_{ss}=630\text{mV}$ erreicht. Im Hüllkurvenmaximum (U_{ss}) entsteht somit wieder eine Spitzenleistung von $PEP=10\text{Watt}$!

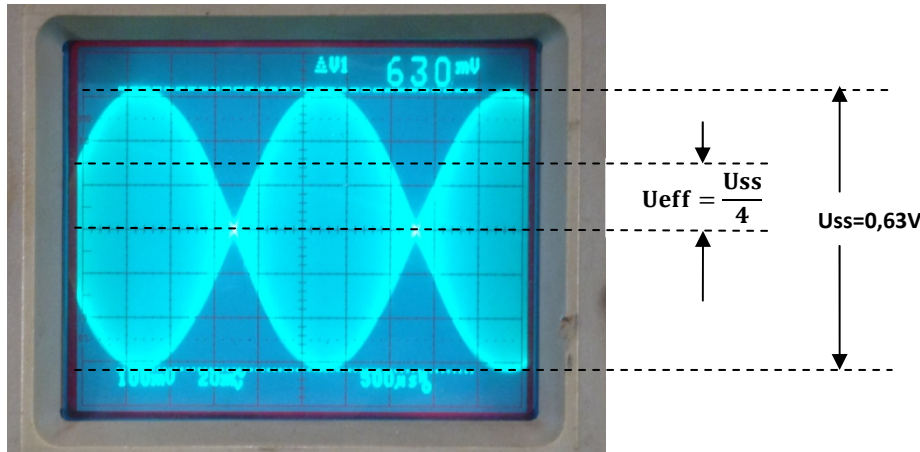


Bild 6: Hüllkurven HF-Signal des Senders bei Modulation mit einem Doppeltonsignal, $U_{ss}=630\text{mV}$

Da es zwischen den um 460Hz verschobenen Hochfrequenzsignalen zu einer Schwebung kommt, bei der sich die beiden gleich großen Signale im Abstand von ca. $2,2\text{ms}$ addieren bzw. auch auslöschen, ergibt sich beim **Maximalwert** die **doppelte Spannung** und somit die **vierfache Leistung** ($P = U^2/R$) für PEP.

Folgende Leistungen lassen sich aus Bild 6 berechnen:

Berechnung der Leistung im Schwebungsmaximum (PEP):

$$U_{ss} (\text{Sender}) = U_{ss} (\text{Scope}) * 100 \text{ (40dB Dämpfung)} = 630\text{mV} * 100 = 63 \text{ Volt}$$

$$P_{PEP} = \frac{(U_{ss}/2)^2}{2 * R_L} = \frac{(63\text{V}/2)^2}{100\Omega} = \frac{1000\text{V}}{100\Omega} = 10 \text{ Watt}$$

Berechnung der mittleren, durchschnittlichen Leistung ($P_{Average}$):

$$P_{AVR} = P = \frac{(U_{ss}/4)^2}{R_L} = \frac{(U_{eff})^2}{R_L} = \frac{(63\text{V}/4)^2}{50\Omega} = 5 \text{ Watt}$$

Ist die Leistung der Einzeltöne nicht bekannt, läßt sie sich ebenfalls aus dem Schwebungssignal in Bild 6 berechnen.

Berechnung der Leistung beider Einzelsignale:

$$P_{\text{Einzelsignal}} = \frac{(U_{ss}/4)^2}{2 * R_L} = \frac{(63\text{V}/4)^2}{100\Omega} = 2,5 \text{ Watt}$$

Ergebnis: Die PEP-Leistung beträgt 10Watt und die mittlere Leistung nur 50% der Spitzenleistung, nämlich $2 * 2,5\text{Watt} = 5\text{Watt}$.

Messergebnis am Spektrumanalysator:

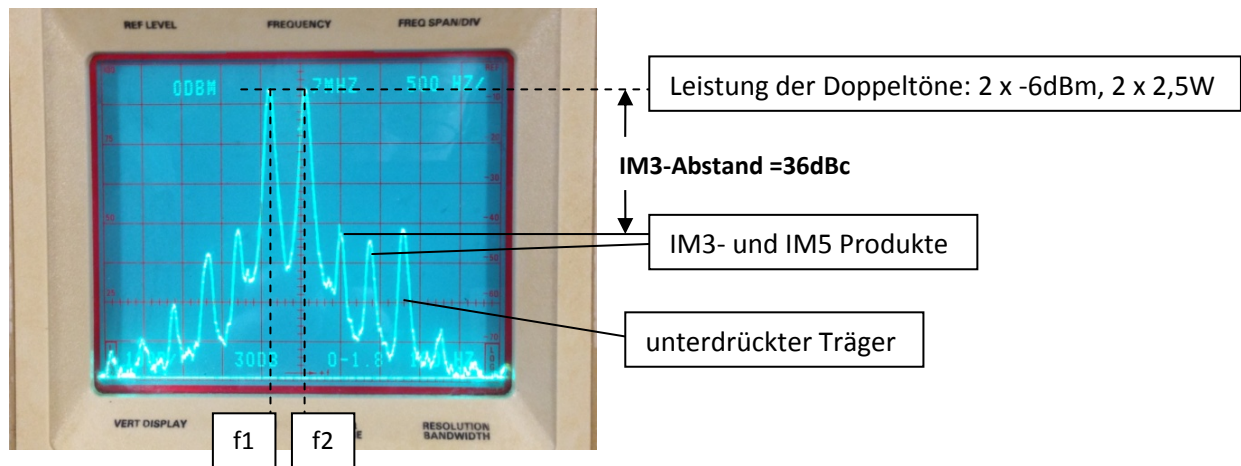


Bild 7: Doppeltönsignal 7001,390kHz und 7001,850kHz

Erst der Spektrumanalysator zeigt die tatsächliche Leistungsverteilung des 2-Ton-Signals im Frequenzbereich. Das Doppelton-Modulationssignal erzeugt zwei gleich große Spektrallinien im Frequenzabstand von 460Hz mit Pegeln von jeweils -6dBm, entsprechend einer Leistung pro Spektrallinie von

$$P_{f_1, f_2} = -6\text{dBm} + 40\text{dB} = +34\text{dBm} = 2,5\text{Watt}$$

Da die Leistung im Schwebungsmaximum jedoch - wie zuvor am Scope nachgewiesen - 4-fach so hoch ist wie bei einem Einzelton, ist die Spitzenleistung nicht 5Watt sondern 10Watt PEP.

Die durchschnittliche Leistung (P_{AVG}) des Zweitönsignals beträgt 2,5Watt + 2,5 Watt = 5 Watt.

Es gilt: Im Fall von zwei Tönen mit gleicher Amplitude ist die mittlere Leistung im Schwebungsmaximum viermal so groß wie die mittlere Leistung eines Einzeltons.

Auch der Analysator zeigt die PEP-Leistung korrekt an, indem man seine Auflösungsbandbreite soweit vergrößert, bis beide Spektrallinien zusammen vom Auflösungsfilter erfasst werden. Im Beispiel liegen die Töne nur 460Hz auseinander und eine Vergrößerung des Auflösungsfilters von 100Hz auf 1kHz erfasst beide Spektrallinien und zeigt nach kurzer Integrationszeit das Maximum des Hüllkurvenspektrums an, nämlich 0dBm, entsprechend 10Watt PEP-Ausgangsleistung!

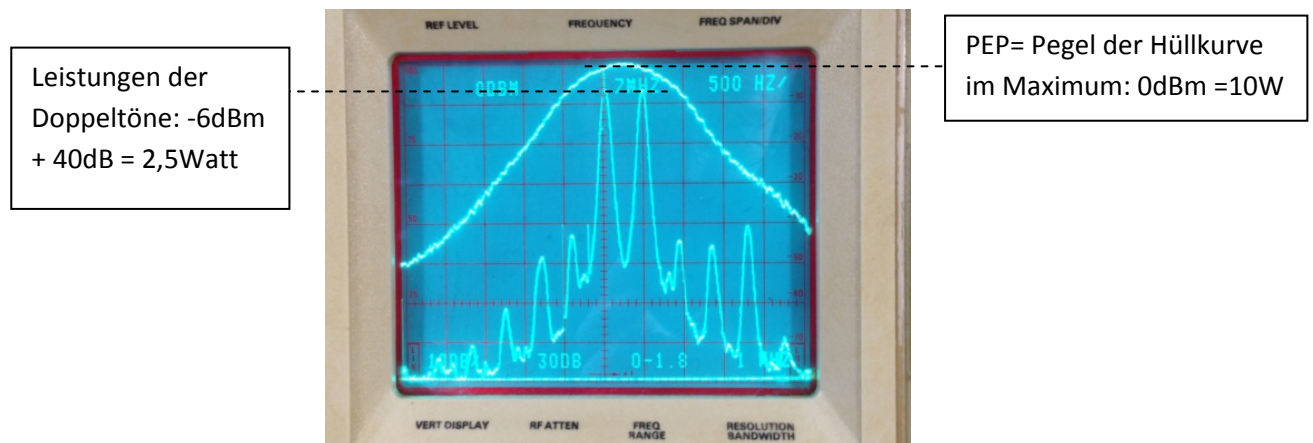


Bild 8: Kumulative Leistungskurve (oben), Hüllkurve des Analysators in Max-Hold Einstellung

Berechnung der PEP-Leistung aus dem Spektrum:

$$P(\text{PEP}) = 0\text{dBm} + 40\text{dB (Dämpfung)} = +40\text{dBm} = 10\text{Watt}$$

Ergebnis:

Oszilloskop und Spektrumanalysator zeigen beide die korrekte PEP-Leistung von 10Watt an.

Weitere Meßergebnisse der Spektrumanalyse:

Bei einer 2-Ton-Messung zeigt uns der Spektrumanalysator neben den Nutzsignalen auch die unerwünschten Signale des Senders, nämlich die Intermodulationsprodukte und Oberwellen im Übertragungsband (Bild 8). Solche Messungen bezeichnet man auch als "In-Band-Intermodulation", da der gesamte SSB-Sender vom Mikrofoneingang bis zum Antennenausgang in die Messung mit eingeschlossen ist. Rechts und links neben den beiden HF-Nutzsignalen sind die Intermodulationsprodukte 3. und 5. Ordnung (IM3, IM5) zu erkennen. Das IM3-Signal ist das stärkste Störsignal mit einem Abstand zu den Nutzsignalen von 36dBc bzw. 42dBc (PEP). Die Modulationsverzerrung des Senders beträgt demnach bei Vollaussteuerung ca. 1%. Diese zusätzlichen Meßergebnisse sind zwar "nice to have", sollen uns aber bei der weiteren Untersuchung der PEP-Ausgangsleistung nicht weiter interessieren, denn die IM-Verzerrungen sind ein ganz anderes Thema.

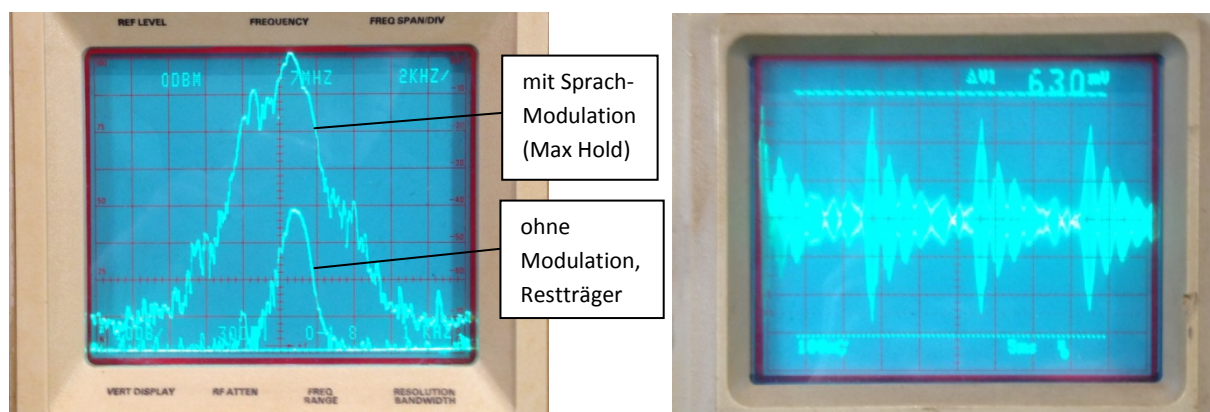


Bild 9: Typisches HF-Signal eines SSB-Senders bei Sprachmodulation, links Frequenz- und rechts Zeitbereich

Messergebnis am SWR-Wattmeter:

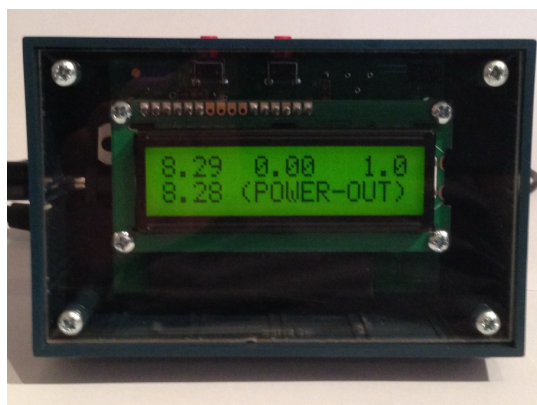


Bild 10: SWR-Meter, Anzeigewert: 8,29Watt PEP, SWR=1.0

Das verwendete SWR-Wattmeter zeigte nur eine Spitzenleistung von $P=8,29\text{Watt}$ an, ein Messfehler von 17%. Auch wenn der Fehler nicht groß erscheint, bei 1000 Watt würden nur 829 Watt angezeigt werden. Das SWR-Wattmeter "versucht" zwar den korrekten Wert anzuzeigen, zeigt stattdessen aber nur irgendeinen Mittelwert an, aber nicht die Leistung im Hüllkurvenmaximum. Leider zeigen viele SWR-Wattmeter den PEP-Wert zu niedrig an. Dieser Messfehler lässt sich auch durch nachträgliches Abgleichen und Kalibrieren des Wattmeters nicht beheben.

Ein zu niedrig anzeigendes PEP-Wattmeter birgt auch Risiken (Bild 11). Falls man die Endstufe mit Sprachmodulation (oder 2-Ton) am SWR-Meter auf das zulässige Maximum (hier 10 Watt) abstimmt, kann die Endstufe in Wirklichkeit schon übersteuert sein, das Ausgangssignal hört sich dann verzerrt und begrenzt an und der Anwender weiß nicht warum, denn sein Wattmeter zeigt ja gerade erst 10 Watt an.

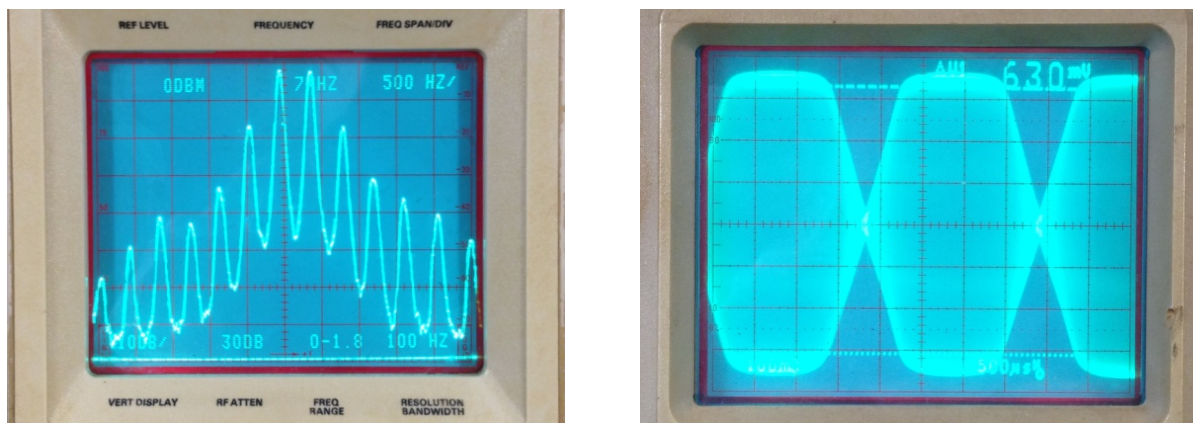


Bild 11: Übersteuerter SSB-Sender (Signalbegrenzung) mit starker Intermodulation
links im Frequenzbereich, rechts im Zeitbereich

3.) Warum zeigt mein SWR-Wattmeter bei PEP zu wenig Leistung an?

Zur Beantwortung der Frage, muss man einen Blick auf die Schaltung des Demodulators im SWR-Powermeter werfen (Bild 17). Der Leistungs-Meßausgang des Richtkopplers leitet sein Signal zu einer Diode, welche für die Gleichrichtung (Demodulation) des HF-Signals zuständig ist. Die gleichgerichtete Spannung am Ausgang der Diode bestimmt das Ergebnis der Leistungsmessung. Im nachfolgenden Messbeispiel soll gezeigt werden, dass bei 2-Ton-Aussteuerung allein die Größe des Ladekondensators C bestimmt, ob als Ergebnis der Momentanwert, der Mittelwert oder der Spitzenwert (PEP) angezeigt wird.

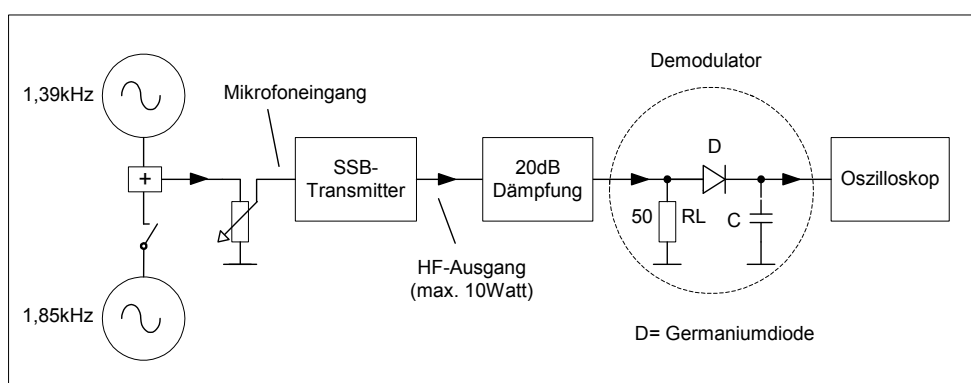


Bild 12: Diodengleichrichter aus SWR-Powermeter

Hierzu verbinden wir den Ausgang des SSB-Sender über ein 20dB-Dämpfungsglied mit einer Gleichrichterdiode (Bild 12) und stellen die HF-Ausgangsleistung des Senders mit einem Eintonsignal (CW) so ein, dass am Ausgang der Diode eine gleichgerichtete Spannung von $U_s=+1,5\text{Volt}$ entsteht. Am Scope erscheint das demodulierte HF-Signal als eine konstante, gerade Linie von $+1,5\text{Volt}$ (Bild 13) und entspricht der mittleren- bzw. PEP-Leistung des Sendesignals.

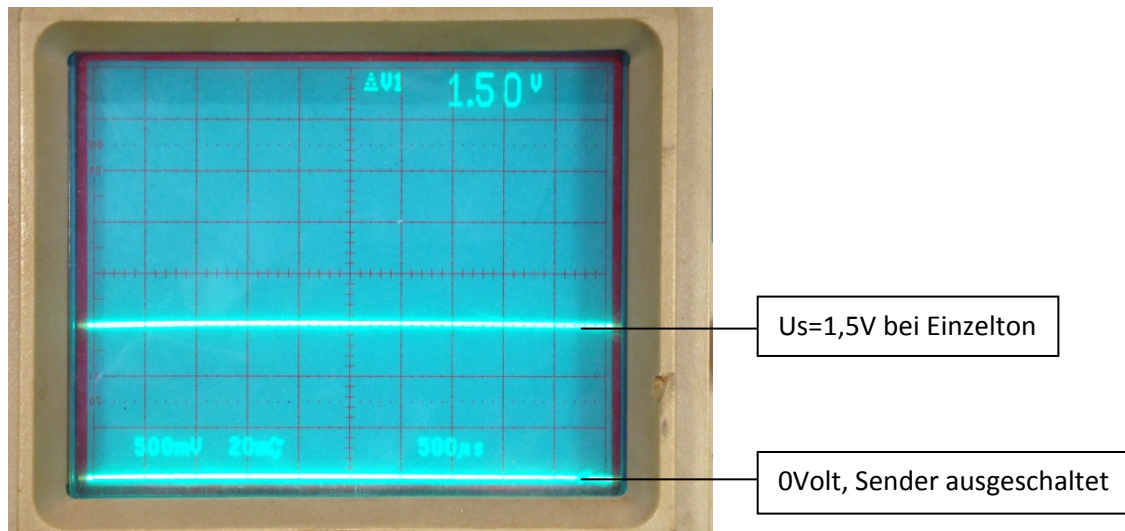


Bild 13: Demodulierte Einzelton-Signal 7001.39kHz, Spitzenspannung: 1,5Volt, C=0

Anschließend führen wir die gleiche Messung mit einem Zweitonsignal durch. Am Scope wird das demodulierte Hüllkurven-Differenzsignal deutlich sichtbar (Bild 14). Aufgrund der Einwegdemodulation kommt aber nur die Hälfte der gesamten Hüllkurve zur Anzeige. Im Maximum hat das Schwebungssignal eine Amplitude von $U_s=+3\text{ Volt}$, also den doppelten Wert des Eintonsignals und damit die 4-fache Leistung.

Wenn diese Signal gemittelt zur Anzeige gebracht wird, z.B. über ein träges Zeigerinstrument, dann kommt nur der Effektivwert von $0,707 \times \text{PEP}$ zur Anzeige und der PEP-Anzeigefehler beträgt 30%!

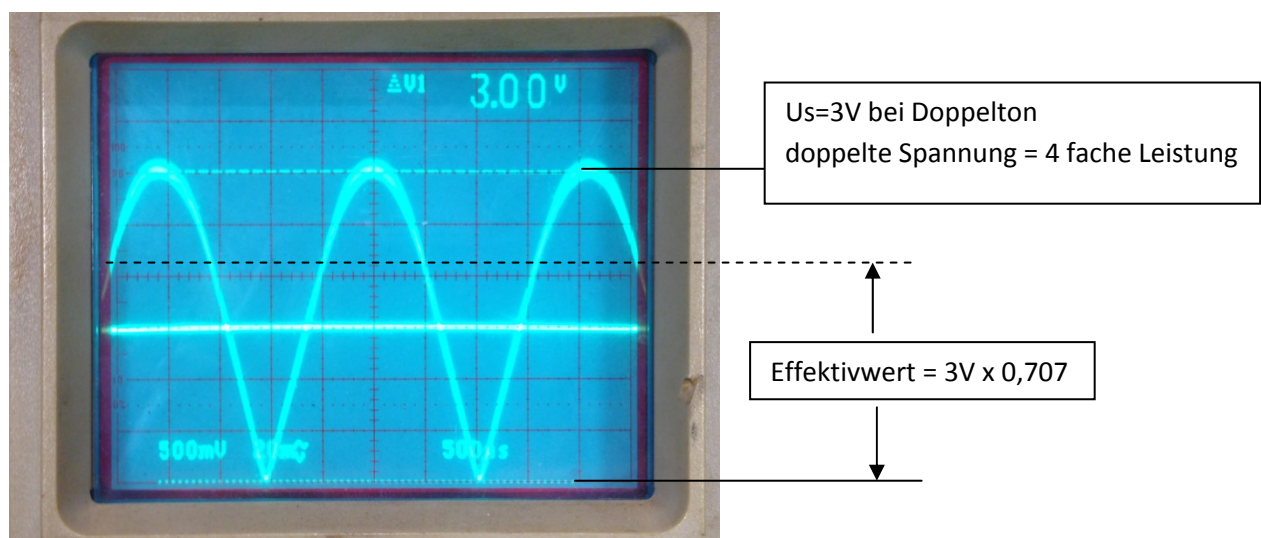


Bild 14: Demoduliertes Doppelton-Signal $f=7001,39\text{kHz} + 7001,85\text{kHz}$, Spitzenspannung: 3Volt, C=0

Abschließend führen wir die Messung mit Glättungskondensatoren von $C = 10\text{nF}$ und $1\mu\text{F}$ durch. Erst bei $C=1\mu\text{F}$ (Bild 15, rechts) wird der Scheitelwert der Hüllkurve als glatte, konstante Spannungslinie von +3Volt am Scope dargestellt. Egal auf welches Anzeigegerät man diesen Messwert weiterleitet, ob Zeigerinstrument oder digitale Anzeige, dieses PEP-Messergebnis ist richtig!

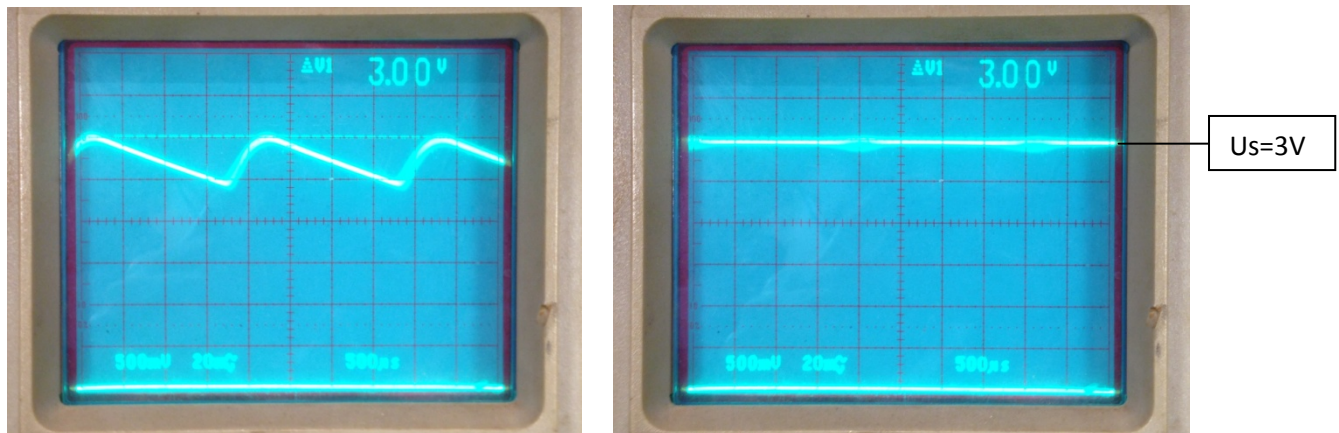


Bild 15: Demoduliertes Doppelton-Signal mit $C=1\text{nF}$ (links) und $C=1\mu\text{F}$ (rechts)

Wenn wir den 2. Ton abschalten und nur einen Ton (CW) übertragen, geht die Anzeige am Scope stets wieder auf konstant +1,5Volt zurück. Egal mit welchem Glättungskondensator C gearbeitet wird, ein CW-Signal wird immer mit dem korrekten Wert angezeigt.

Dieses Messbeispiel funktionierte nur, weil der Eingangswiderstand des Oszilloskops mit $1\text{M}\Omega$ sehr hochohmig ist und die Ladung des Kondensators C nicht abfließen kann.

Ergebnis:

Dem zufolge benötigt ein PEP-Wattmeter einen zusätzlichen "Maximalwertspeicher", welcher die größte aller auftretenden Signalspitzen erfasst, speichert und zur Anzeige bringt.

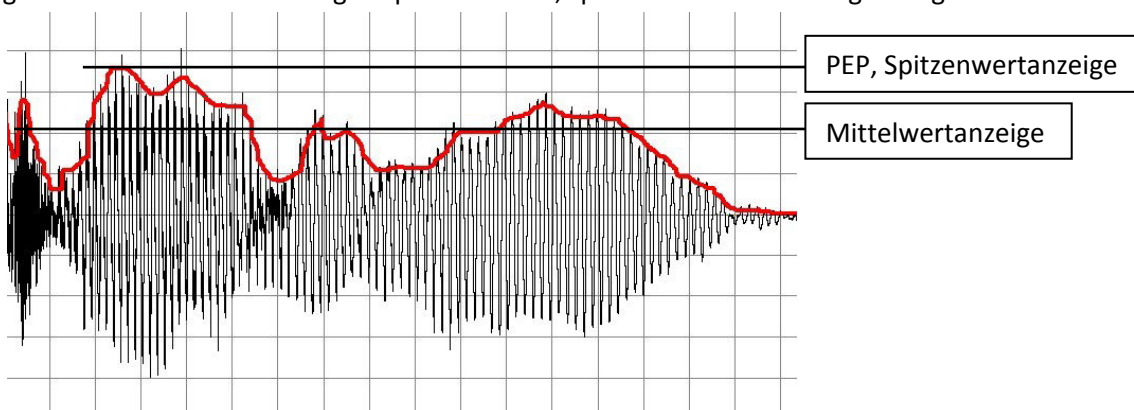


Bild 16: Sprachmodulation mit PEP und Mittelwert

Wie aus Bild 6 und 14 zu erkennen, wird die Spitzenleistung des Doppeltonsignals im Hüllkurvenmaximum nur alle $2,2\text{mS}$ erreicht. Bei Sprachmodulation (Bild 16) verhält es sich ganz ähnlich, auch hier variieren die Amplituden der Frequenzen zwischen Null bis Maximum innerhalb

sehr kurzer Zeit. Die "Sample & Hold-Schaltung" muß also sehr schnell ansprechen und den Maximalwert für einige Sekunden halten, ähnlich eines Schleppzeigers.

4.) PEP-Anzeigeverstärker

Zur Messung, Erfassung und Darstellung des PEP-Wertes, muß die vom Richtkoppler gelieferte Spannung hochohmig erfasst und über eine Beobachtungszeit von einigen Sekunden fest gehalten werden. Eine solche Sample & Hold-Schaltung (Abtast-Halte-Glied) realisiert man am einfachsten mit einem OPV.

Der Richtkoppler-Detektor im Beispiel (Bild 17) hat zwei Ausgänge: "Average" zur Anzeige des Mittelwertes (Standard) und "PEP" zur Anzeige des Spitzenwertes. Der PEP-Ausgang benötigt noch eine nachgeschaltete Sample & Hold-Schaltung, s. Bild 18. Die Wirkung der Max-Hold Schaltung zeigt Bild 19.

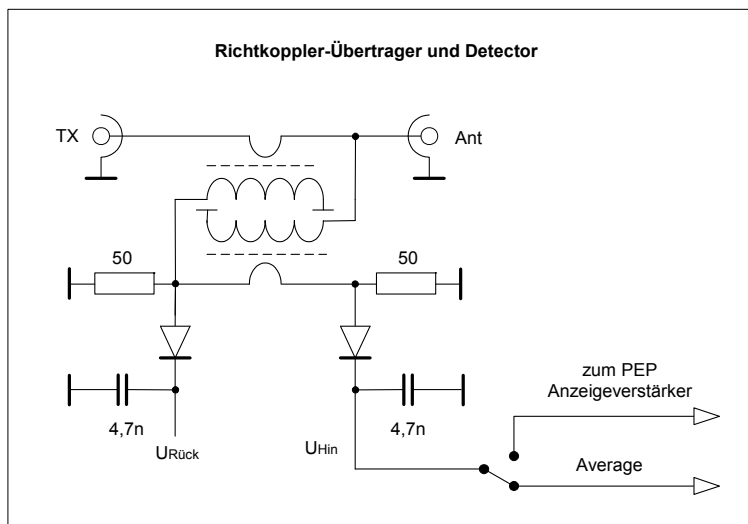


Bild 17: Richtkoppler und Detektor für Leistungsmessung

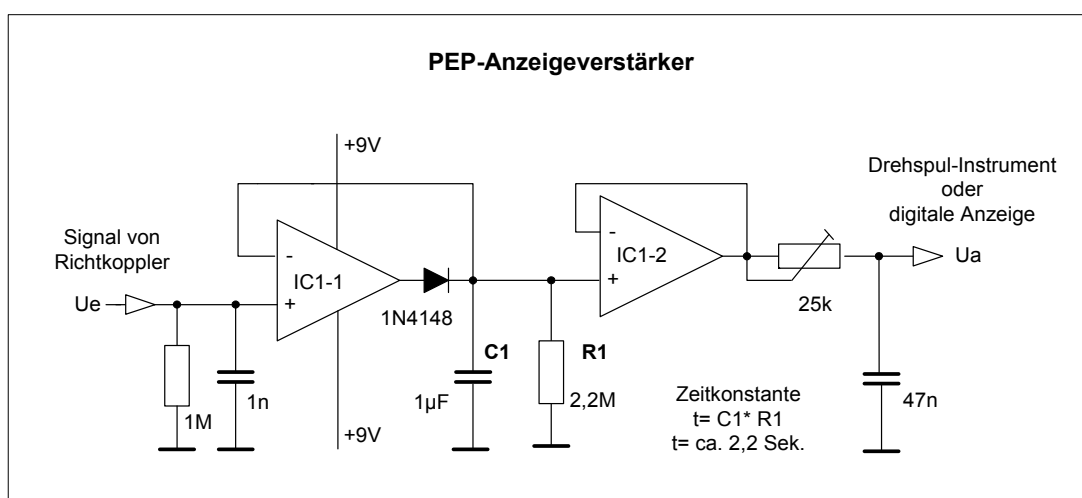


Bild 18: Beispiel eines Scheitelwertmessers mit Sample & Hold Schaltung

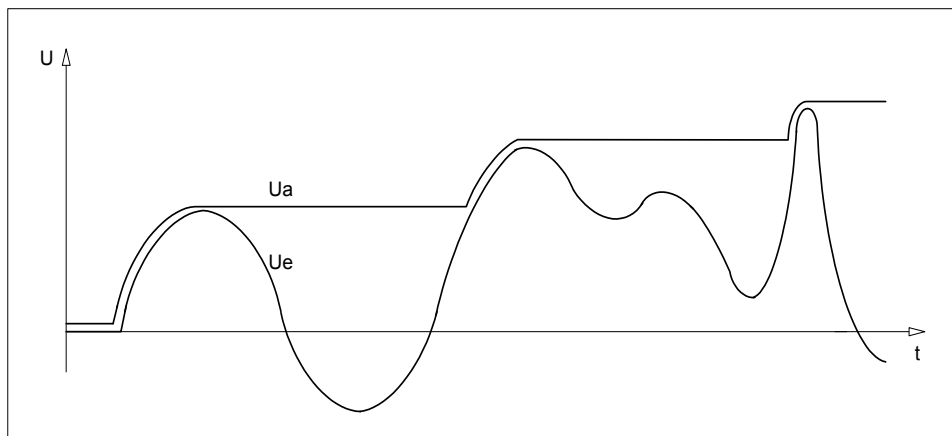


Bild 19: Zeitlicher Verlauf der Signale im Scheitelwertmesser mit Sample & Hold Schaltung

Das demodulierte HF-Signal erreicht den hochohmigen Eingang von IC1-1, ohne dabei an Spannung zu verlieren. Am niederohmigen Ausgang von IC1 wird C1 sehr schnell auf den momentanen Spitzenwert (PEP) aufgeladen und hält diese Spannung für einige Sekunden fest. D1 verhindert das Abfließen der Ladung. Die "Hold"-Zeit, im Beispiel eine Beobachtungszeit von ca. 2 Sekunden, wird durch R1 und C1 vorgegeben und kann angepasst werden.

Solche oder ähnlich aufgebaute PEP-Schaltungen können auch nachträglich in ein SWR-Wattmeter eingebaut werden, um es damit "PEP-tauglich" zu machen. Hierzu gibt es auch fertige Bausätze (1).

5.) PEP-Wattmeter mit digitaler Signalverarbeitung (DSP)

Moderne SWR-Meter/Wattmeter arbeiten mit digitaler Signalverarbeitung (DSP). Hierbei wird das demodulierte Signal der Richtkopplerdiode sehr schnell abgetastet (A/D-gewandelt), zwischengespeichert und nach kurzer Beobachtungszeit das größte Signal als PEP-Wert zur Anzeige gebracht. Solche Wattmeter funktionieren ohne zusätzlichen PEP-Anzeigeverstärker, allerdings muß die Abtastfrequenz hoch genug sein!

Würde das vom Diodengleichrichter gelieferte, demodulierte HF-Signal der Sprachfrequenz von 0,3-3kHz beispielsweise nur mit 1000Hz abgetastet, entstünde ein starkes Aliasing (Unterabtastung) und die Meßergebnisse wären falsch. Erst ab 6000Hz (besser 9000Hz) Abtastrate funktioniert die A/D-Wandlung eines 3kHz NF-Signals fehlerfrei (Nyquist-Shannon-Abtasttheorem).

Eine weitere Fehlerquelle kann durch ein falsch dimensioniertes Glättungsfilter hinter der Gleichrichter-Diode des Richtkopplers entstehen. Ein zu groß bemessenes RC-Glied, welches als Tiefpassfilter wirkt, glättet das demodulierte NF-Signal und liefert dem nachgeschalteten A/D-Wandler ein zu geringes Signal. Die Grenzfrequenz des verwendeten RC-Filters muß $\geq 3\text{kHz}$ sein, damit alle NF-Signalspitzen auch zum A/D-Wandler gelangen. Mit z.B. $R=10\text{K}$ und $C=100\text{nF}$ beträgt die Grenzfrequenz nur 160Hz (-3dB) und das gesamte übrige NF-Spektrum von 160 Hz bis 3kHz wird amplitudenreduziert an den A/D-Wandler weiter geleitet. Das PEP-Ergebnis muß dann zwangsläufig falsch (zu niedrig) sein, egal wie schnell die DSP anschließend das Signal abtastet.

Anmerkung:

Auch bei meinem SWR-Meter/Wattmeter mit DSP-Verarbeitung waren die Glättungskondensatoren hinter den Gleichrichterdioden des Richtkopplers zunächst falsch dimensioniert (zu groß) und es

zeigte deswegen zu niedrige PEP-Werte an. Der Hersteller hat den Fehler inzwischen erkannt und korrigiert.

Zusammenfassung

Wer sich nicht sicher ist, ob das verwendete Wattmeter die Spitzenleistung (PEP) auch korrekt anzeigt, sollte die Ausgangsleistung seines Senders nur mit einem einzelnen Ton (CW) abgleichen und nicht mit Sprachmodulation oder Doppelton.

Jeder Funkamateurler mit etwas Bastelerfahrung kann die beschriebene "2-Ton-Messung" selbst durchführen und sein Wattmeter auf "PEP-Tauglichkeit" testen. Benötigt werden lediglich ein 2-Ton NF-Generator und eine Scope.

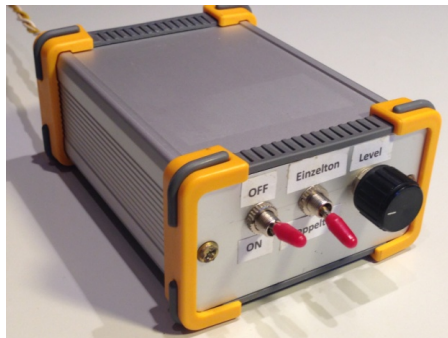


Bild 20: Eigenbau NF-Sinus Doppelton-Generator

Literatur

(1) KW HF-Power-Meter PEP -Anzeige zum nachrüsten

<http://www.dg7xo.de/selbstbau/kw-pep-modul.html>

(2) Projekt mW-Meter mit PEP und AVG/RMS Anzeige

<http://www.dl4jal.eu/mwattmeter/mwattmeter.html>

(3) HF-mW-Meter mit PEP und AVG/RMS Anzeige

http://www.dl4jal.eu/Vortraege/vortrag_mw_meter.pdf

(4) Richtkoppler und SSB-Messtechnik

<http://www.oe3hkl.com/index.php/hf-measurements/richtkoppler-und-ssb-messtechnik>

(5) Measuring Transmitter Power with the Oscilloscope

<http://preciserf.com/wp-content/uploads/2012/04/Appnote-4-Power-tests1.pdf>

(6) In-Band Intermodulationsmessung

https://dc4ku.darc.de/Inband_Intermodulation.pdf

Werner Schnorrenberg,
DC4KU, dc4ku@darc.de
20.10.2014

Rev.: 23.12.2015

APPENDIX

Leistung eines Doppeltensignals

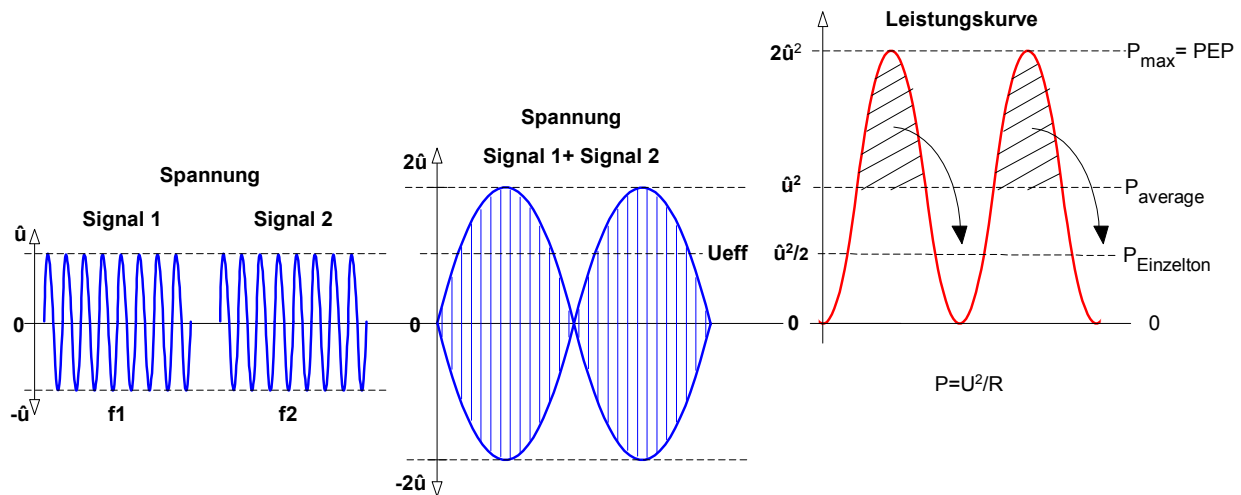


Bild 1: Einzelsignale f_1 und f_2 , Summensignal f_1+f_2 und Leistungskurve, $\hat{u}_{\text{Signal1}} = \hat{u}_{\text{Signal2}} = \hat{u} = 15,8\text{V}$

- max. Spannung der Einzelsignale: $\hat{u}_{\text{Signal1}} = \hat{u}_{\text{Signal2}} = \hat{u}$
- max. Spannung des Doppeltensignals: $\hat{u}_{\text{Signal1}} + \hat{u}_{\text{Signal2}} = 2\hat{u}$
- max. Leistung (PEP) des Doppeltensignals: $2\hat{u}^2/R$

Ermittlung der Spitzenleistungen aus der Leistungskurve (rot):

$$PEP = \frac{2\hat{u}^2}{R} = \frac{2 * 15,8\text{V} * 15,8\text{V}}{50\Omega} = \mathbf{10 \text{ Watt}}$$

Ermittlung der durchschnittlichen Leistung aus der Leistungskurve (rot):

$$P = P_{avg} = \frac{\hat{u}^2}{R} = \frac{15,8\text{V} * 15,8\text{V}}{50\Omega} = \mathbf{5 \text{ Watt}} \quad (\text{mittlere Leistung, Average Power})$$

Ermittlung der Einzeltonleistung:

$$P_{\text{Einzelton}} = \frac{1/2 * \hat{u}^2}{R} = \frac{1/2 * 15,8\text{V} * 15,8\text{V}}{50\Omega} = \mathbf{2,5 \text{ Watt}}$$

Effektivspannung des Doppeltensignals

$$U_{eff} = \sqrt{P_{avg} * R} = \sqrt{5\text{Watt} * 50\Omega} = 15,8 \text{ Volt}$$

$$U_{eff} = \hat{u} = 15,8 \text{ Volt}$$

Die Effektivspannung (U_{eff}) des Doppeltensignals entspricht der Spitzenspannung (\hat{u}) der Einzelsignale.