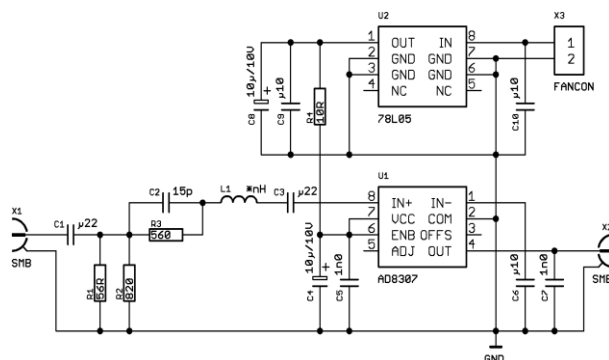


HF-Leistungsmessung mit dem NWT

Helmut Stadelmeyer

Die stark ausgeprägte Frequenzabhängigkeit des AD8307-Ausgangssignals von nahezu 10 dB ist einer genauen Leistungsmessung nicht zuträglich. Nachstehend wird gezeigt, wie man aus dem NWT dennoch einen guten Leistungsmesser bis 450 MHz und maximal 200 W machen kann.

Auf der CD, die dem Buch [1] beiliegt, ist im Beitrag „Simple RF-Power Measurement“ eine Schaltung beschrieben, mit der man diese unangenehme Eigenschaft des AD8307 sehr gut in den Griff bekommen soll. Dem Text nach kann damit im Bereich von 500 kHz bis 600 MHz die Leistung auf $\pm 0,5$ dB genau gemessen werden. Dieser Beitrag ist erstmalig in der QST 2001/06 erschienen. Erreicht wurde das mit einem dem Detektor-IC vorgeschalteten Netzwerk, das aus einer RCL-Kombination besteht. Abb. 1 zeigt die Schaltung dieser Version.



HF-Leistungsmessung mit dem NWT

Weil Bauteile hinzukommen, ist der Umbau des Detektors #1 auf der Hauptplatine nicht sinnvoll, denn die Änderung wäre wegen möglicher Abweichungen bei der Anordnung der Bauteile nicht ausreichend nachbausicher. Aus demselben Grund ist für den Detektor #2 eine neue Leiterplatte notwendig, weil nur so die Bauteilanordnung genau einzuhalten ist.

Die Simulation zeigt, daß das Netzwerk an der unteren Frequenzgrenze um ungefähr 15 dB dämpft und bei 500 MHz nur mehr um 9 dB. Diese Schaltung ist also weitaus besser zur Kompensation der Frequenzabhängigkeit des AD8307 geeignet als jene in Abb. 1.

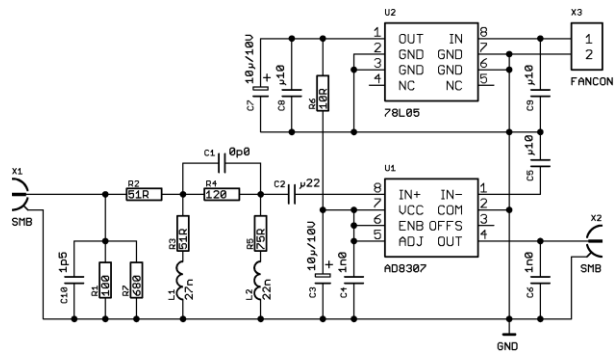


Abb. 5: Eingangsbeschaltung nach DK80H mit einigen Änderungen

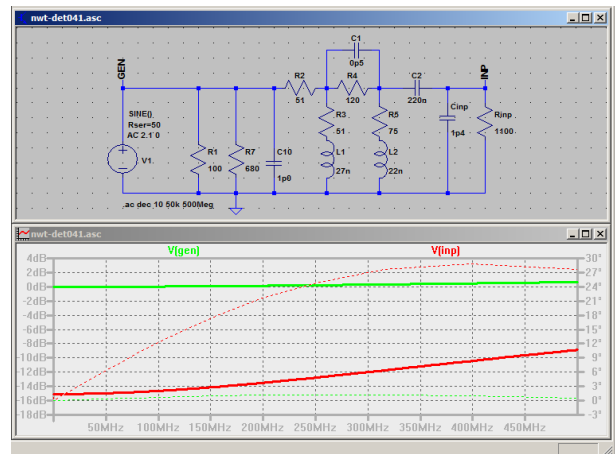


Abb. 6: Simulation mit LTSpice

Daß die Simulation nicht ganz mit den weiter unten angeführten Meßergebnissen übereinstimmt, ist unter anderem auf den Umstand zurückzuführen, daß die parasitären Werte von Bauteilen und Leiterplatte unberücksichtigt geblieben sind: Ein Widerstand 1206 hat eine Kapazität von ungefähr 0,2 pF zwischen seinen Anschlüssen und eine Induktivität von 3 nH. Diese Werte kommen schon fast an die Größenordnung der Bauteilwerte heran. C1 ist deshalb bei der Simulation entgegen dem Schaltplan mit 0,5 pF angenommen. Durch Verändern einzelner Bauteilwerte läßt sich der Einfluß auf den Frequenzgang sehr schön untersuchen.

Hinweise zu den Bauteilen:

Für die Induktivitäten L1 und L2 eignen sich SMD-Bauteile der Größe 1210. C10 und R7 sind huckepack auf R1 anzubringen. Abb. 7 bis 10 zeigen Bestückungsplan und Leiterplatten-Layout. Die parallel zu R4 liegende Kapazität C1 ist nicht notwendig, der Platz bleibt frei; der Grund dafür ist möglicherweise das gegenüber dem Entwurf von DK80H geänderte Leiterplatten-Layout. Der Koppelkondensator C2 soll eine große Kapazität haben, damit der Detektor eine niedrige untere Grenzfrequenz erreicht. In der Baugröße 1206 oder auch 1210 (hochkant einlöten!) ist der aber nicht überall erhältlich. Man kann sich mit zwei übereinander liegenden Bauteilen behelfen.

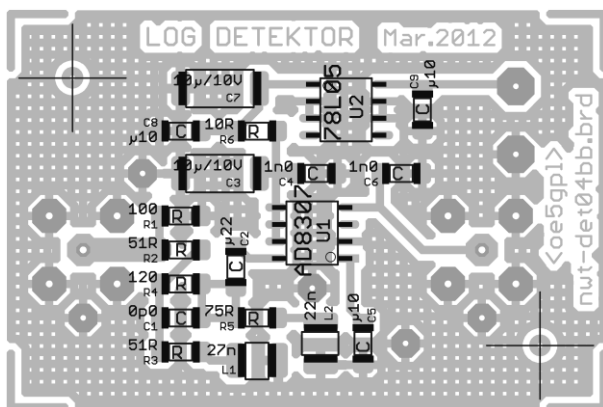


Abb. 7: Bestückungsplan Unterseite

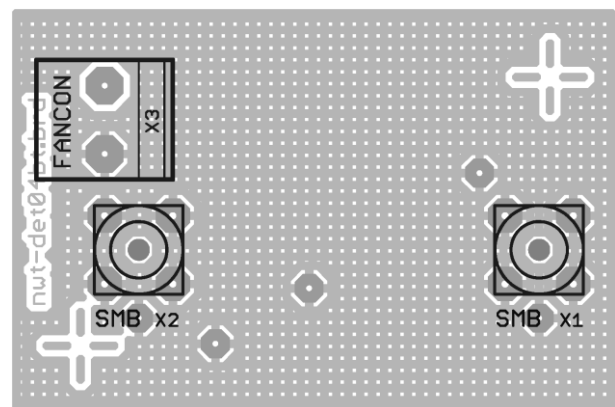


Abb. 8: Bestückungsplan Oberseite

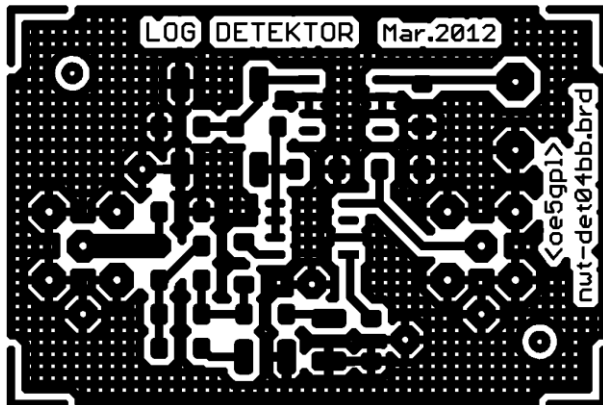


Abb. 9: Leiterplattenlayout Unterseite (vergrößert)

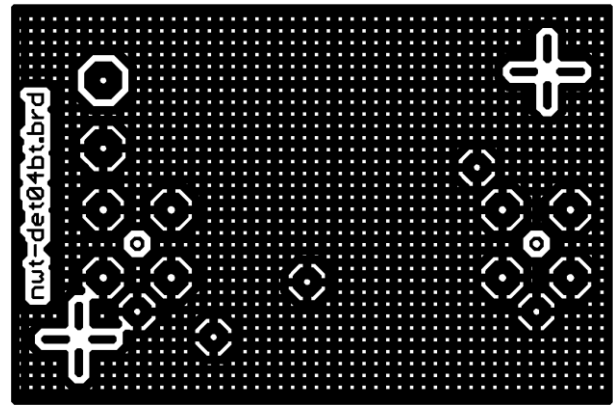


Abb. 10: Leiterplattenlayout Oberseite (vergrößert)

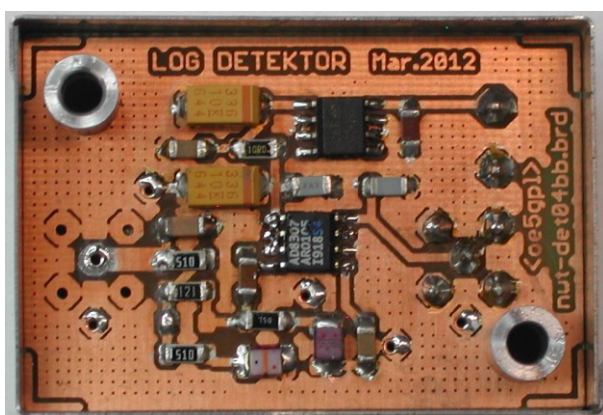


Abb. 11: Unterseite der bestückten Leiterplatte

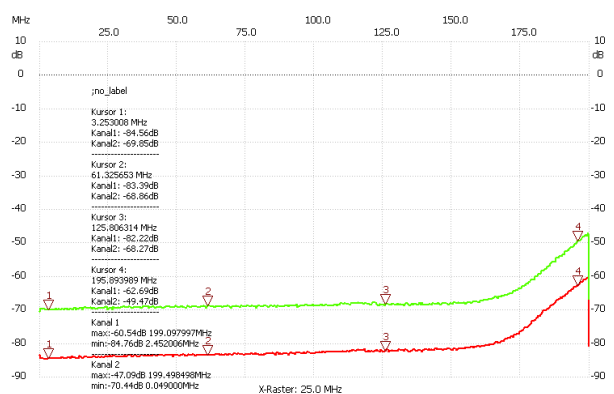


Abb. 12: Unterschied im Rauschflur zwischen Detektor #1 und #2

Es wurden 2 Musterexemplare angefertigt, um herauszufinden, ob Nachbauten ähnliche Ergebnisse liefern. Das Muster B ist dann noch mit drei aus einer größeren Anzahl entnommenen Exemplaren des AD8307 bestückt und jedesmal vermessen worden, um den Einfluß von fertigungsbedingten Unterschieden zumindest ein wenig zu erkennen. Der Stromverbrauch von Nr.1 beträgt 6,34 mA, der von Nr.2 7,04 mA und der von Nr.3 6,78 mA. Herstellwoche der Nr.1 ist 2001/05, die der Nr.2 2000/14 und Nr.3 ist 2000/16 gefertigt worden.

Vor Beginn der Pegelmessungen wurde der Detektor jedesmal bei 100 MHz und +10 dBm mit einem sehr guten externen 40-dB-Dämpfungsglied kalibriert (dazu die SW-Korrektur auf den Wert Null setzen!). Dabei hat sich gezeigt, daß die Eingangsbeschaltung den Rauschflur im unteren Frequenzbereich um fast 15 dB (was sehr gut mit der Simulation übereinstimmt), beim ersten Drittel um 14,5 dB, beim zweiten um 14 dB und gegen das Ende hin um 13 dB gegenüber dem Detektor #1 anhebt. Das tut keineswegs weh, weil man bei Bedarf jederzeit auf den anderen Detektor ausweichen kann. Zudem wird durch die Änderung der Dynamikbereich des Detektors #2 ja nicht kleiner, sondern nur nach oben hin verschoben. Die Belastbarkeit von R1, R3 und U1 setzt dem aber bei 20 dBm eine Grenze.

Die in den Abb. 13 bis 16 ersichtliche rote Kurve zeigt die Abweichung der NWT-Anzeige vom Sollwert ohne Verwendung der Korrekturtabelle *defsonde2.hfm*. Sie gilt für einen Eingangspegel von 10 dBm, die blaue für 0 dBm, die grüne für -20 dBm und die schwarze Linie gilt für das Vergleichsgerät URY. Die von diesem Gerät angezeigten Werte stimmen mit denen eines HP436A mit HP 8482A-Sensor sehr gut überein.

Die Unterschiede zwischen den Mustern A und B (Abb. 13 und 14) sind gering. Bei den AD8307 hingegen gibt es anscheinend eine größere Streuung, wie schon der unterschiedlich große Stromverbrauch vermuten läßt: Die Abb. 14 bis 16 zeigen, daß beim Exemplar Nr. 2 die Kompensationsschaltung weniger wirksam ist, denn besonders im oberen Frequenzbereich ist der Unterschied zu den beiden anderen auffallend groß. Insgesamt ist die Abweichung über den ganzen Frequenzbereich größer und verläuft deutlich anders. Das Muster B hat schließlich den AD8307 Nr.3 erhalten.

HF-Leistungsmessung mit dem NWT

Hat man sich zum Ziel gesetzt, mit dem NWT die Leistung möglichst genau zu messen, dann wird man vielleicht aus mehreren Exemplaren des AD8307 das am besten geeignete herausuchen. Das dann notwendige wiederholte Auslöten läßt sich mit Heißluft völlig problemlos bewerkstelligen [4].

Insgesamt ist das Ergebnis der Versuche sehr erfreulich, weil die Abhängigkeit des Ausgangssignals von der Frequenz im uns interessierenden Bereich jetzt deutlich weniger als ± 1 dB beträgt – eine gute Grundlage für die weiter unten aufgelistete, softwaremäßige Meßfehlerkorrektur.

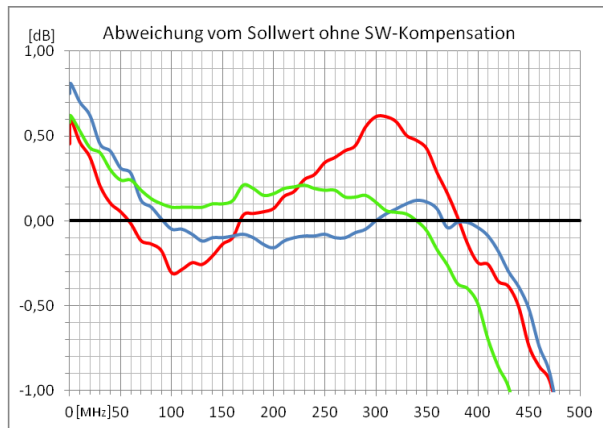


Abb. 13: Muster A mit AD8307 Nr. 1

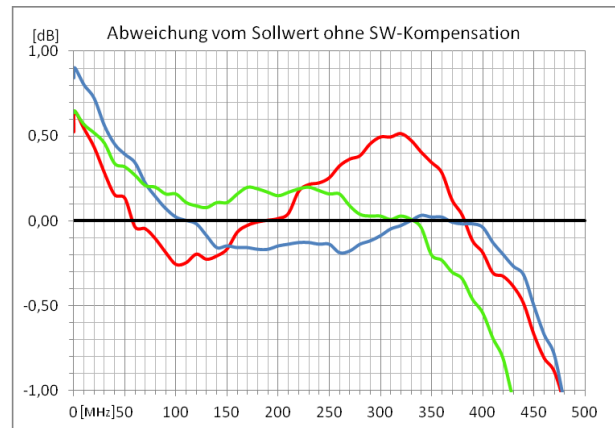


Abb. 14: Muster B mit AD8307 Nr. 1

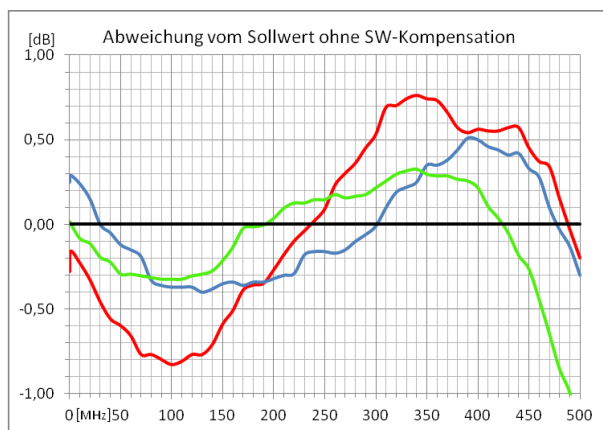


Abb. 15: Muster B mit AD8307 Nr. 2

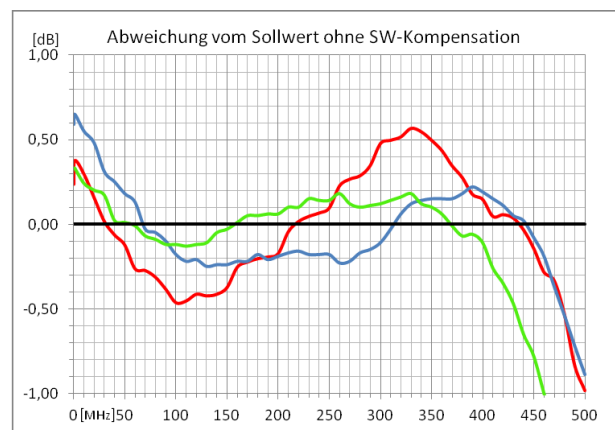


Abb. 16: Muster B mit AD8307 Nr. 3

Die Kurven zeigen aber auch, daß die Abweichung von der Ideallinie pegelabhängig ist. Einen Hinweis auf diese Eigenschaft gibt das AD8307-Datenblatt (Seite 4, Figure 3, Log Conformance vs. Input Level). Wir müssen uns deshalb entscheiden, bei welcher Pegelstufe die Anzeige am genauesten sein soll.

Beim Gerät des Verfassers wurde der 10-dBm-Bereich aufgrund folgender Überlegung gewählt: Bei Amateurfunk-Transceivern ist die Ausgangsleistung auf den jeweiligen Bändern eine sehr interessante Größe, die man so genau wie möglich wissen möchte. Im Kurzwellenbereich liefern die meisten dieser Geräte um die 100 W entsprechend 50 dBm. Das ergibt zusammen mit einer 40-dB-Sonde am Detektor gerade die 10 dBm Eingangsleistung. Sendeleistungen von 10, 1 und 0,1 W werden nicht so genau angezeigt, aber in diesem Bereich kommt es zumeist auch nicht so sehr darauf an. Pegel unter 0,1 W werden ohne die Sonde, also direkt, gemessen.

Die verbliebene Abweichung läßt sich wiederum zu einem guten Teil mit der DL4JAL-Software kompensieren. Andreas Lindenau hat dazu die Rechnersoftware und die Firmware für die Leistungsmessung überarbeitet und einerseits die Anzahl der Korrektur-Stützstellen für die Meßwerte kräftig erhöht, andererseits ist im Menü EINSTELLUNG/OPTION/ALLGEMEIN die Auflösung der Anzeige auf zwei Kommastellen wählbar. Um diese Vorteile nutzen zu können, ist es notwendig, die letztgültige Programmversion auf dem Rechner zu installieren und ein Firmware-Update beim Prozessor des NWT zu machen. Beide Programme sind auf der Internetseite von Andreas zum Herunterladen verfügbar [5]. Nach der Installation sind beide Detektoren neu zu kalibrieren (nicht nur für die Leistungsmessung!).

HF-Leistungsmessung mit dem NWT

Die Vorgangsweise zur Ermittlung der Korrekturfaktoren ist einfach, man braucht dazu aber einen Generator, der den gewünschten Pegel im Bereich zwischen 100 kHz und 500 MHz liefern kann, ein gutes, nicht zu langes Koaxialkabel und einen zuverlässigen Leistungsmesser. Mit 25 Stützstellen wird der gesamte Bereich in 20-MHz-Schritten abgedeckt, wobei man für den Korrekturwert die Mitte der Schritte wählt, also 10, 30, 50 MHz usw. Zuerst notiert man die Anzeige des am Kabelende angeschlossenen Leistungsmessers, dann ist der Detektor #2 des NWT am Kabelende anzuschließen und der Meßwert zu notieren. Das ist für jede Stützstelle zu machen; die Differenz der beiden Meßwerte ist der jeweilige Korrekturfaktor.

Nachstehend sind die entsprechenden Werte aus der Textdatei *defsonde2.hfm* aufgelistet. Der Text paßt für beide Muster dieser Baugruppe und ist als Ausgangspunkt für den Feinabgleich von Nachbauten verwendbar.

wattoffset10=-0.31	wattoffsetstr0=0 - 20 MHz: -0,66 dB
wattoffset11=-0.37	wattoffsetstr10=200 - 220 MHz: -0,31 dB
wattoffset0=-0.66	wattoffsetstr11=220 - 240 MHz: -0,37 dB
wattoffset12=-0.53	wattoffsetstr12=240 - 260 MHz: -0,53 dB
wattoffset13=-0.56	wattoffsetstr13=260 - 280 MHz: -0,56 dB
wattoffset14=-0.8	wattoffsetstr14=280 - 300 MHz: -0,80 dB
wattoffset15=-0.84	wattoffsetstr15=300 - 320 MHz: -0,84 dB
wattoffset16=-0.85	wattoffsetstr16=320 - 340 MHz: -0,85 dB
wattoffset17=-0.77	wattoffsetstr17=340 - 360 MHz: -0,77 dB
wattoffset18=-0.71	wattoffsetstr18=360 - 380 MHz: -0,71 dB
wattoffset19=-0.53	wattoffsetstr19=380 - 400 MHz: -0,53 dB
wattoffset1=-0.42	wattoffsetstr1=20 - 40 MHz: -0,42 dB
wattoffset20=-0.38	wattoffsetstr20=400 - 420 MHz: -0,38 dB
wattoffset21=-0.21	wattoffsetstr21=420 - 440 MHz: -0,21 dB
wattoffset22=-0.02	wattoffsetstr22=440 - 460 MHz: -0,02 dB
wattoffset23=0.23	wattoffsetstr23=460 - 480 MHz: 0,23 dB
wattoffset24=0.55	wattoffsetstr24=480 - 500 MHz: 0,55 dB
wattoffset25=0	wattoffsetstr25=NN
wattoffset26=0	wattoffsetstr26=NN
wattoffset27=0	wattoffsetstr27=NN
wattoffset28=0	wattoffsetstr28=NN
wattoffset29=0	wattoffsetstr29=NN
wattoffset2=-0.22	wattoffsetstr2=40 - 60 MHz: -0,22 dB
wattoffset3=-0.07	wattoffsetstr3=60 - 80 MHz: -0,07 dB
wattoffset4=0.07	wattoffsetstr4=80 - 100 MHz: 0,07 dB
wattoffset5=0.1	wattoffsetstr5=100 - 120 MHz: 0,10 dB
wattoffset6=0.07	wattoffsetstr6=120 - 140 MHz: 0,07 dB
wattoffset7=0.03	wattoffsetstr7=140 - 160 MHz: 0,03 dB
wattoffset8=-0.15	wattoffsetstr8=160 - 180 MHz: -0,15 dB
wattoffset9=-0.22	wattoffsetstr9=180 - 200 MHz: -0,22 dB

Mit Hilfe der Korrekturtabelle beträgt nunmehr die Abweichung im Bereich von 1 MHz bis 450 MHz bei einem Detektor-Eingangspegel von 10 dBm und sorgfältigem Abgleich weniger als 0,2 dB gegenüber dem Vergleichsgerät URY, was weniger als 5 % entspricht - für einen selbstgebauten HF-Leistungsmesser ein guter Wert. Es ist zudem möglich, bei einer besonders interessanten Frequenz den Korrekturwert so anzugeben, daß die Anzeige dort fast keinen Fehler hat.

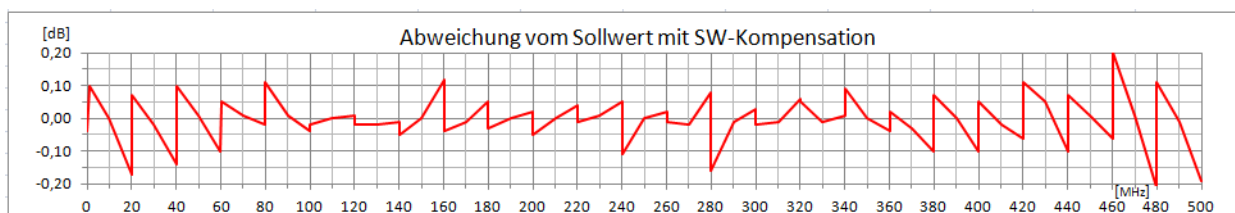


Abb. 17: Abweichung der Anzeige bei 10 dBm und softwaremäßiger Korrektur

Eine HF-Leistungsmessung wird umso genauer, je besser die Anpassung des Detektors an die Systemimpedanz von 50 Ohm ist. Abb. 18 und 19 zeigen den Verlauf beim Muster B von 1 MHz bis 500 MHz mit

HF-Leistungsmessung mit dem NWT

den im Schaltbild Abb. 5 ersichtlichen Bauteilwerten. Die Rückflußdämpfung beträgt im Bereich bis 450 MHz wenigstens 23 dB entsprechend einem größten VSWR von 1,15.

Um diesen Wert zu erreichen, war es notwendig, R1 und R2 gegenüber dem Entwurf von DK80H ein wenig zu ändern. C10 dient ebenfalls der Verbesserung der Anpassung. Das Ausgangssignal der Baugruppe erreicht die geringste Frequenzabhängigkeit, wenn L2 eine Induktivität von 22 nH hat; die Änderungen sind vielleicht durch unterschiedliches Leiterplattenlayout bedingt.

Im Zuge der Versuche ist die Drossel L2 auch einmal durch eine der Größe 1407 ersetzt worden, was die Frequenzabhängigkeit vergrößert hat, anstatt sie zu verringern. Offensichtlich ist man mit der annähernd quadratischen Bauform gut bedient.

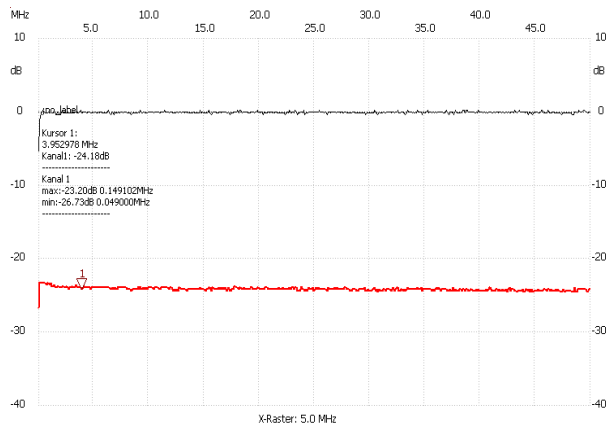


Abb. 18: Rückflußdämpfung des Detektors #2 bis 50 MHz

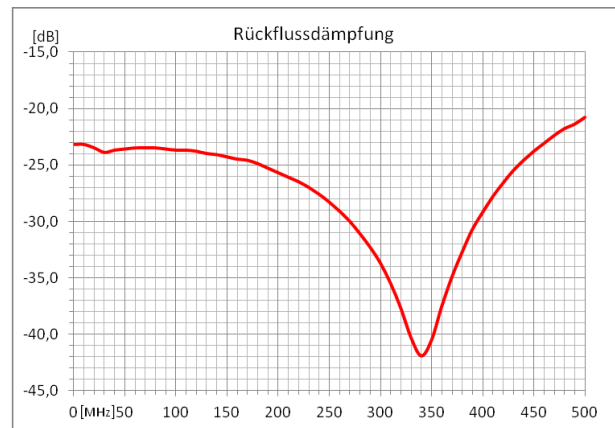


Abb. 19: Rückflußdämpfung des Detektors #2 über den gesamten Bereich bis 500 MHz

Alle zum Nachbau notwendigen Unterlagen sind in der Datei *nwt-det04.zip* auf [6] enthalten: Leiterplattenlayout *nwt-det04bt.ps* für Ober- und *nwt-det04bb.ps* für die Unterseite, Vergleichsmaßstab *150mm.ps*, Bestückungspläne *nwt-det04dt.pdf* und *nwt-det04db.pdf* sowie das Schaltbild *nwt-det04s.pdf*.

Verbindungskabel und Genauigkeit einer HF-Leistungsmessung

Es bewährt sich in der Praxis, wenn ein Leistungsmesser auf die direkt an der Eingangsbuchse des Meßgerätes anstehende Leistung kalibriert ist. So vermeidet man Meßfehler, die durch unterschiedlich lange Zuleitungen entstehen. Dazu ist es allerdings notwendig, die Dämpfung eines vorgeschalteten Kabels als Korrekturfaktor zu berücksichtigen, wie das in Abb. 20 beim Detektor #2 gezeigt ist, denn wir wollen ja die Leistung am Kabeleingang wissen.

Bei 200 MHz hat ein normales RG58-Kabel mit 1 Meter Länge samt Steckern fast 0,4 dB Durchgangsdämpfung (Abb. 21) und führt ohne Korrektur zu einem sehr beachtlichen Meßfehler von mehr als 9 %. Also nie darauf vergessen, bei solchen Messungen möglichst gute Kabel zu verwenden und die Kabel-dämpfung zu berücksichtigen, damit das Ergebnis stimmt.

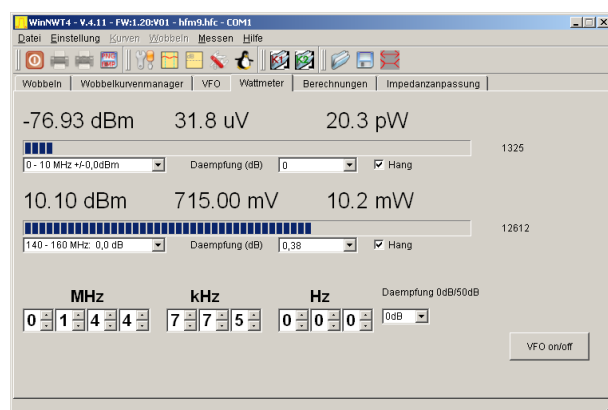


Abb. 20: Korrektur der Kabelverluste

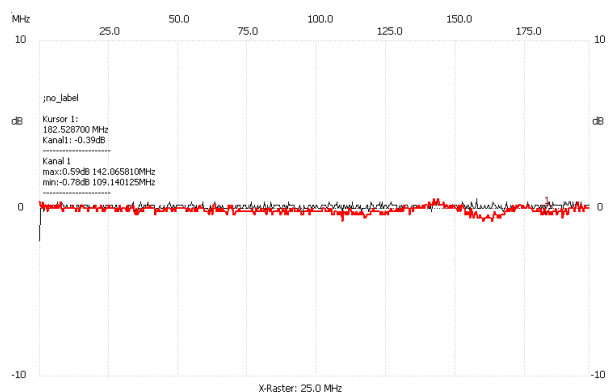


Abb. 21: Durchgangsdämpfung bei 1 m normalem RG58

HF-Leistungsmessung mit dem NWT

Die Dämpfung des Kabels zwischen Generator und Prüfling, das für die Untersuchungen der Detektoren verwendet worden ist, wurde bei 10 dBm (rote Linie in Abb. 22), 0 dBm (blaue Linie) und bei -20 dBm (grüne Linie) gemessen. Abweichungen von einer Ideallinie entstehen durch kleine Unregelmäßigkeiten im Kabel. Bei den Kurven in Abb. 13 - 16 ist die Dämpfung herausgerechnet. Wer Genaueres über hochfrequente Leistungsmessung wissen möchte, wird auf [7] verwiesen.

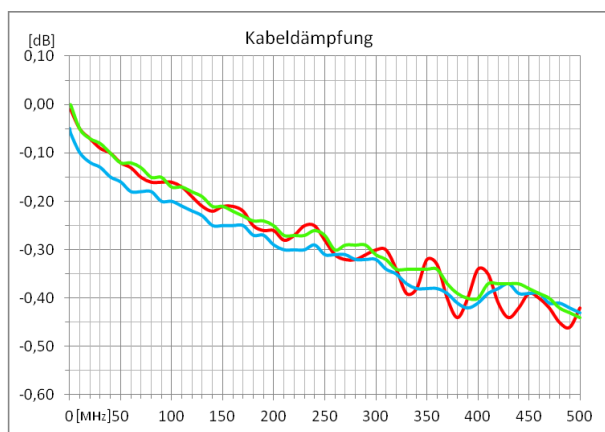


Abb. 22: Durchgangsdämpfung bei 2 * 55 cm SUHNER Enviroflex 400 mit gutem BNC-Verbinder

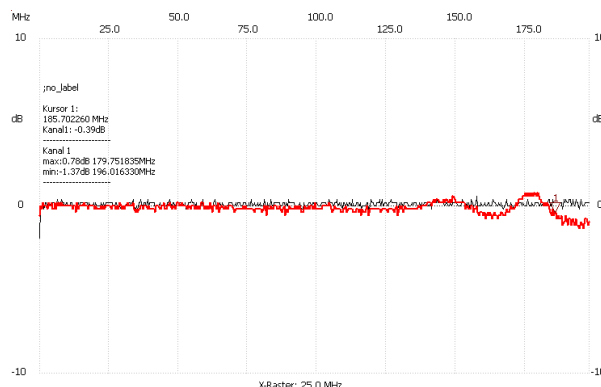


Abb. 23: Durchgangsdämpfung bei 1 m schlechtem RG58

Weil sich dieser Detektor zur Leistungsmessung so gut eignet, ist die Idee naheliegend, den NWT zusammen mit der in einem anderen Beitrag beschriebenen 40-dB-Leistungsmeßsonde [8] als universelles HF-Wattmeter bis in das 70-cm-Band für Leistungen bis 200 W zu verwenden.

Zusammenfassung

Dieser Leistungsmesser kann mit Geräten der besseren Amateurfunk-Klasse locker mithalten, er ist also für jeden, der noch kein solches Meßgerät hat, eine höchst willkommene und kostengünstige Erweiterung der Meßmöglichkeiten. Die Genauigkeit professioneller Geräte kann er allerdings wegen der nicht perfekten Anpassung, der im Vergleich zu solchen Geräten geringen Anzahl von Korrektur-Stützstellen und der fehlenden Temperaturkompensation nie erreichen.

Hat man Zugriff auf ein gutes Meßgerät zum Vergleich und soll die Leistungsmessung mit dem NWT möglichst genau werden, dann ist es sinnvoll, die Korrekturwerte im oben angeführten Teil der Datei *defsonde2.hfm* selbst nachzuvollziehen. Die Dämpfung des HF-Kabels vom Generator zum Detektor muß man dabei berücksichtigen.

Viel Freude mit dem wieder ein wenig vielseitiger gewordenen NWT!

Helmut, OE5GPL

Verweise und Quellen:

- [1] W7ZOI, KK7B und W7PUA: „Experimental Methods in RF Design“, Seite 7.8
- [2] Scherrer, Thomas, OZ2CPU, Digital Wattmeter English mainpage (Sep. 2002): <http://webx.dk/oz2cpu/radios/miliwatt.htm>
- [3] Lategahn, Jan, DK3LJ, A minimalistic 500MHz Wattmeter: <http://lategahn.2log.de/index.php?A-minimalistic-500MHz-Wattmeter>
- [4] OAFV-HomePage, TECHNIK/WERKSTATT/TIPPS, Bauteile mit dem Heißluftgebläse auslöten: <http://www.oe5.oevsv.at/opencms/technik/>
- [5] Lindenau, Andreas, DL4JAL, Firmware für alle NWT: <http://www.dl4jal.eu/>
- [6] OAFV-HomePage, TECHNIK/MESSEN/NWT, HF-Leistungsmessung mit dem NWT: <http://www.oe5.oevsv.at/opencms/technik/>

HF-Leistungsmessung mit dem NWT

- [7] HP Application Note HP-AN-64-1, Kapitel 5, Mismatch Errors, Seiten 26 - 30:
http://www.hparchive.com/Application_Notes/HP-AN-64-1.pdf
- [8] OAFV-HomePage, TECHNIK/MESSEN/NWT, Leistungsmeß-Sonde für den NWT:
<http://www.oe5.oevsv.at/opencms/technik/>

Nachtrag:

Beim Gerät des Verfassers ist die Leistungsmessung mit dem Detektor #1 ebenfalls neu kalibriert worden. Der Frequenzbereich ist dabei zum NWT passend von 1 MHz bis 200 MHz gewählt, wobei alle 10 MHz eine Stützstelle angeordnet ist (bei 5, 15, 25 MHz usw.). Die zugehörigen Korrekturwerte in der Textdatei *defsonde1.hfm* sind nachstehend aufgelistet:

wattoffset0=-1.13	wattoffsetstr0=0 - 10 MHz: -1,13 dB
wattoffset10=-0.04	wattoffsetstr10=100 - 110 MHz: -0,04 dB
wattoffset11=0.13	wattoffsetstr11=110 - 120 MHz: 0,13 dB
wattoffset12=0.19	wattoffsetstr12=120 - 130 MHz: 0,19 dB
wattoffset13=0.31	wattoffsetstr13=130 - 140 MHz: 0,31 dB
wattoffset14=0.54	wattoffsetstr14=140 - 150 MHz: 0,54 dB
wattoffset15=0.77	wattoffsetstr15=150 - 160 MHz: 0,77 dB
wattoffset16=0.91	wattoffsetstr16=160 - 170 MHz: 0,91 dB
wattoffset17=1.05	wattoffsetstr17=170 - 180 MHz: 1,05 dB
wattoffset18=1.31	wattoffsetstr18=180 - 190 MHz: 1,31 dB
wattoffset19=1.64	wattoffsetstr19=190 - 200 MHz: 1,64 dB
wattoffset1=-0.98	wattoffsetstr1=10 - 20 MHz: -0,98 dB
wattoffset20=0	wattoffsetstr20=NN
wattoffset21=0	wattoffsetstr21=NN
wattoffset22=0	wattoffsetstr22=NN
wattoffset23=0	wattoffsetstr23=NN
wattoffset24=0	wattoffsetstr24=NN
wattoffset25=0	wattoffsetstr25=NN
wattoffset26=0	wattoffsetstr26=NN
wattoffset27=0	wattoffsetstr27=NN
wattoffset28=0	wattoffsetstr28=NN
wattoffset29=0	wattoffsetstr29=NN
wattoffset2=-0.88	wattoffsetstr2=20 - 30 MHz: -0,88 dB
wattoffset3=-0.77	wattoffsetstr3=30 - 40 MHz: -0,77 dB
wattoffset4=-0.63	wattoffsetstr4=40 - 50 MHz: -0,63 dB
wattoffset5=-0.60	wattoffsetstr5=50 - 60 MHz: -0,60 dB
wattoffset6=-0.50	wattoffsetstr6=60 - 70 MHz: -0,50 dB
wattoffset7=-0.46	wattoffsetstr7=70 - 80 MHz: -0,46 dB
wattoffset8=-0.37	wattoffsetstr8=80 - 90 MHz: -0,37 dB
wattoffset9=-0.22	wattoffsetstr9=90 - 100 MHz: -0,22 dB

Abb. 24 zeigt, daß bei diesem eingeschränkten Frequenzbereich und entsprechender Wahl der Korrekturwerte die Abweichung des Detektors #1 ebenfalls weniger als 0,2 dB beträgt. Selbstverständlich sind die Korrekturwerte wiederum anhand eines genauen Vergleichsgerätes zu ermitteln, weil die AD8307 ja Unterschiede aufweisen.

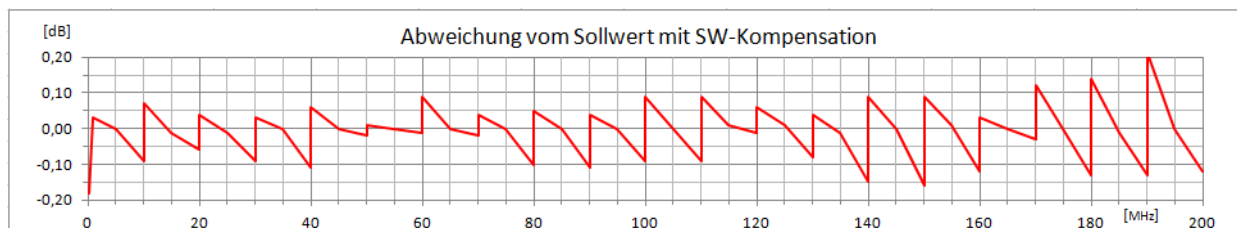


Abb. 24: Anzeigefehler des NWT bei Verwendung des Detektors #1 im Vergleich zum URY mit URV5-Z2-Sensor von R&S