

Multi Resonance Finder für die Doppelzepp

Wer mit klarem Kopf eine Doppelzepp plant, stellt sich zumindest die folgenden Fragen:

- Welche Länge müssen Dipol und Feeder haben, damit die PA auf möglichst vielen Amateurfunkbändern ein möglichst geringes SWV "sieht"?
- Welches Speisekabel ist dafür am besten geeignet?
- Welche Bänder lassen sich mit dem Tuner überhaupt nicht anpassen und für welche gibt es zumindest einen kleinen Hoffnungsschimmer?

Der *MultiResonanceFinder* (MRF) führt Millionen von Rechenoperationen aus, um diese Fragen zu beantworten.

Genau wie der *Doppelzepprechner* (DZR) ermittelt auch der MRF die Fußpunktimpedanzen gestreckter Dipole im Freiraum auf der Basis von Integralen der Antennentheorie /5/.

Aber: im Unterschied zum DZR sucht der MRF **vollautomatisch** nach den Dipol-Feeder-Kombinationen, die auf maximal vielen Bändern resonant sind.

Dabei werden sowohl symmetrische als auch unsymmetrische (OCF-) Dipole betrachtet.

N_Res	I_Dipol	OCF	I_1	I_Feeder	SWR_160	SWR_80	SWR_60	SWR_40	SWR_30	SWR_20	SWR_17	SWR_15	SWR_12	SWR_10	SWR_6
5	27,8	0,5	13,9	12,49	833,04	8,3	41,15	1,05	231,33	1,22	2,82	262,06	1,35	1,74	1,97
5	27,8	0,5	13,9	12,5	831,82	8,35	41,14	1,06	231,49	1,24	2,89	262,19	1,39	1,7	1,94
5	27,8	0,5	13,9	12,51	830,6	8,4	41,13	1,07	231,66	1,27	2,97	262,31	1,44	1,68	1,92
5	27,8	0,5	13,9	12,52	829,38	8,46	41,12	1,09	231,82	1,3	3,04	262,41	1,49	1,65	1,91
5	27,8	0,5	13,9	12,53	828,16	8,51	41,11	1,1	231,97	1,34	3,12	262,51	1,55	1,64	1,92
5	27,8	0,5	13,9	12,54	826,95	8,57	41,1	1,11	232,13	1,37	3,19	262,59	1,6	1,62	1,93
5	27,8	0,5	13,9	12,55	825,74	8,62	41,09	1,13	232,28	1,41	3,27	262,65	1,66	1,62	1,96

Bedienung

- Geben Sie, entsprechend der örtlichen Verhältnisse, die minimale (*Min. Length*) und die maximale mögliche (*Max. Length*) Länge des Dipols ein. Innerhalb dieses Bereichs wird der MRF nach einer optimalen Spannweite des Dipols suchen.
- Mit der Schrittweite (*Step*) legen Sie fest, um welchen Betrag sich die Länge bei jeder neuen Berechnung vergrößern soll, eine kleine Schrittweite liefert zwar genauere SWVs, erhöht allerdings die Rechenzeit.
- Der MRF berechnet nicht nur symmetrische, sondern auch unsymmetrische (OCF-) Dipole. Im Feld *OCF Points* tragen Sie deshalb eine Zahl (1, 2, ...) ein die festlegt, wie viele mögliche Speisepunkte betrachtet werden sollen. Die Zahl 1 bedeutet, dass immer nur symmetrische Dipole infrage kommen, denn diese haben nur einen einzigen Speisepunkt, der bei 50% ihrer Spannweite liegt.

Eine (ganze) Zahl größer 1 umfasst neben symmetrischen auch unsymmetrische Dipole, der Wert 10 bedeutet zum Beispiel, dass 10 Speisepunkte berechnet werden, die bei 50%, 45%, ... 5% der Spannweite liegen.

Je höher Sie *OCF Points* wählen, umso länger dauert natürlich die Rechenzeit. Andererseits vergrößert sich damit auch die Chance, einen optimalen Speisepunkt außerhalb der Mitte zu finden.

- Geben Sie nun die Daten des Feeders ein, also dessen minimale und maximale Länge, die Schrittweite der Längenänderung sowie die Kabeldaten, d.h. Wellenwiderstand Z_w , Verkürzungsfaktor VF , Kabeldämpfung bei einer Bezugsfrequenz (i.d.R. 10MHz). Ausgehend von dieser Frequenz werden die Dämpfungswerte für die übrigen Frequenzen nach der bekannten Formel (Abhängigkeit von der Quadratwurzel des Frequenzverhältnisses) interpoliert.
- Wie Sie sehen, umfasst die Suche nach Resonanzpunkten 11 Amateurfunkbänder, inbegriffen auch das relativ neue 60m-Band. Die zugehörigen Frequenzen sind bereits standardmäßig in den entsprechenden Feldern eingetragen, können aber von Ihnen korrigiert werden. Wenn Sie ein Band nicht interessiert, können Sie den Wert 0 eintragen, das spart Rechenzeit.
- In das Feld *SWR_{max}* tragen Sie das SWR ein, das Sie gerade noch als "Resonanz" akzeptieren wollen. Da viele PAs erst ab einem $SWR > 2$ herunterregeln, hat dieser Wert eine besonders wichtige Bedeutung. Logisch auch, dass der MRF für kleinere *SWR_{max}*-Werte weniger Resonanzpunkte liefern wird als für größere.
- Schließlich geben Sie in das Feld *N_{min}* die Mindestanzahl von Resonanzpunkten ein, die eine bestimmte Kombination aus Dipol- und Feederlänge liefern muss, um in die Ergebnismatrix übernommen zu werden. *N_{min}* wählen Sie in der Regel zwischen 1 und 5.

Die Zahl 1 bedeutet, dass auch alle Kombinationen mit angezeigt werden, die nur auf einem einzigen Band resonant sind. Allerdings erscheinen damit am Ende der Ergebnismatrix auch sehr viele für den Mehrbandbetrieb nutzlose Kombinationen.

Hingegen sind Kombinationen mit Resonanzen auf 4 oder gar 5 Bändern hochinteressant. 5 Resonanzen (bei *SWR_{max}* = 2) sind selten zu toppen, es sei denn, man vergrößert *SWR_{max}*.

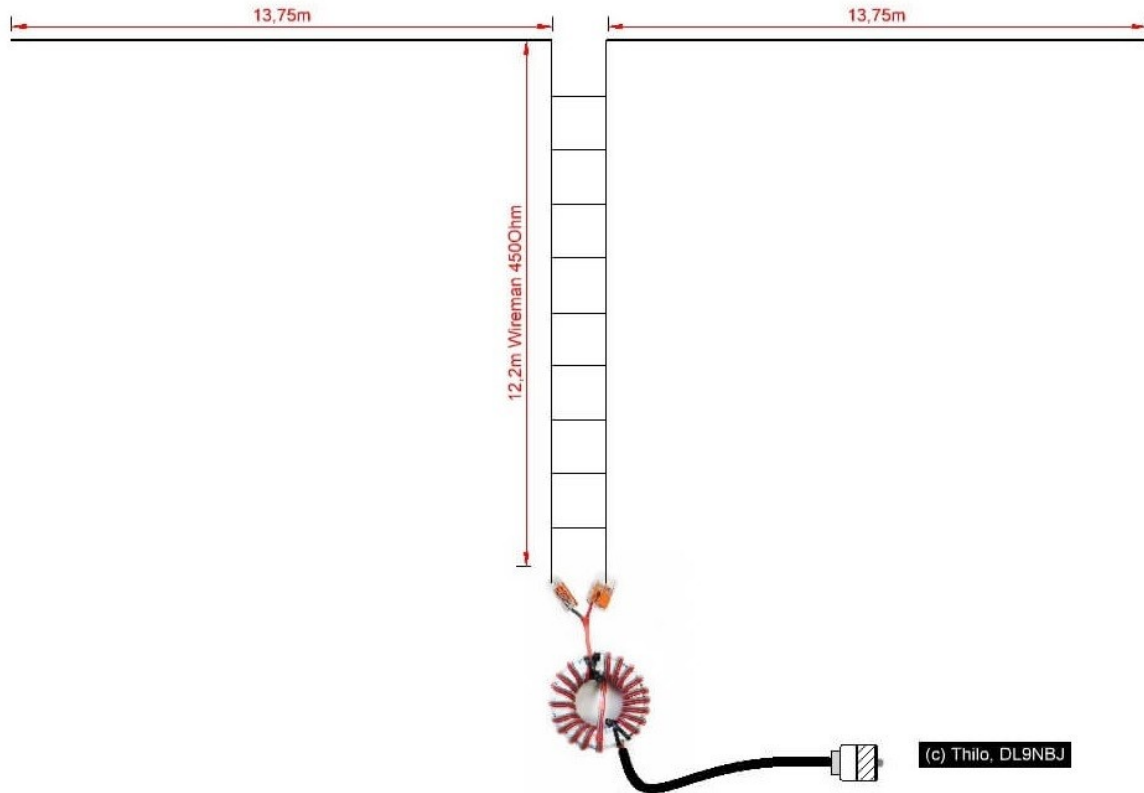
- Nach Klick auf "Start" kann es, je nach Parametereinstellungen, Sekunden bis Minuten dauern, bis die Ergebnismatrix erscheint (mit "Cancel" lässt sich der vorzeitige Abbruch erzwingen).
- Wenn Sie die Abstände zwischen minimaler und maximaler Dipol- bzw. Feederlänge zu groß gewählt haben oder deren Längenabstufungen zu fein einstellen oder der Arbeitsspeicher Ihres PCs zu klein ist, kann es passieren, dass das Programm mit einem *OutOfMemory*-Fehler abbricht. Für den MRF bestens geeignet ist ein Windows 10 PC mit 8GB RAM.

Beispiel 1a

ZS6BWS-Wunderantenne

Bei einer Spannweite zwischen 20 und 30m und einem Feeder aus halboffener Bandleitung *CQ553flex von Wireman*, führt Sie der MRF zielgerichtet zur so genannten "ZS6BWS-Wunderantenne", wie sie zum Beispiel OM Thilo, DL9NBJ, in [Thilo's Amateurfunk & Elektronik Blog](#) ausführlich beschrieben hat:

ZS6BKW Antenne - Wunderantenne für 5 Bänder ohne Traps



Die Ergebnismatrix des MRF für den Parameter *OCF-Points = 10* zeigt, dass auch unsymmetrische Dipole dabei sind (dazu müssen Sie das Gitter weiter nach unten scrollen).

Die besten Lösungen führen immer zu einem 27,8m langen symmetrischen Dipol (OCF=0,5) mit einer Feederlänge von 12,49m bis ca. 12,55m:

N_Res	L_Dipol	OCF	L_1	L_Feeder	SWR_160	SWR_80	SWR_60	SWR_40	SWR_30	SWR_20	SWR_17	SWR_15	SWR_12	SWR_10	SWR_6
5	27,8	0,5	13,9	12,49	833,04	8,3	41,15	1,05	231,33	1,22	2,82	262,06	1,35	1,74	1,97
5	27,8	0,5	13,9	12,5	831,82	8,35	41,14	1,06	231,49	1,24	2,89	262,19	1,39	1,7	1,94
5	27,8	0,5	13,9	12,51	830,6	8,4	41,13	1,07	231,66	1,27	2,97	262,31	1,44	1,68	1,92
5	27,8	0,5	13,9	12,52	829,38	8,46	41,12	1,09	231,82	1,3	3,04	262,41	1,49	1,65	1,91
5	27,8	0,5	13,9	12,53	828,16	8,51	41,11	1,1	231,97	1,34	3,12	262,51	1,55	1,64	1,92
5	27,8	0,5	13,9	12,54	826,95	8,57	41,1	1,11	232,13	1,37	3,19	262,59	1,6	1,62	1,93
5	27,8	0,5	13,9	12,55	825,74	8,62	41,09	1,13	232,28	1,41	3,27	262,65	1,66	1,62	1,96

Die durch Fettdruck hervorgehobenen 5 Resonanzen des Dipols liegen auf den Bändern 40m (1,05), 20m(1,22), 12m(1,35), 10m(1,74) und 6m(1,97)-Band.

Das 17m-Band(2,82) und auch das 80m-Band (8,3) stellen den Antennentuner vor keine Probleme. Schwierig bis unmöglich wird die Antennenanpassung auf den Bändern 30m(231), 15m(262) und 160m(833).

Bemerkungen:

- Für das CQ553 benutzt das Beispiel nicht die vom Hersteller angegebenen (und offensichtlich ungenauen) Katalogwerte ($Z_w=450\Omega$, $VF=0,9$), sondern die in /2/ veröffentlichten Daten ($Z_w=392\Omega$, $VF=0,89$, $0,63\text{dB}/100\text{m}$ bei $3,5\text{MHz}$; $0,74\text{dB}/100\text{m}$ bei $10,1\text{MHz}$; $1,11\text{dB}/100\text{m}$ bei 28MHz).
- Meistens wird ZS6BKW-Wunderantenne an einem unsymmetrischen Koppler betrieben und mit einem so genannten "Balun für undefinierte Impedanzen" und einem kurzen 50Ω -Verlängerungskabel mit dem Tuner verbunden. Dies ändert zwar kaum etwas am Resonanzverhalten, wohl aber am Gesamtwirkungsgrad der Antenne (siehe Beispiel 5).

Beispiel 1b

Kontrolle mit dem DZR

Fast zentimetergenau kommt auch der [Doppelzepprechner](#) bei einem symm. Dipol von $27,5\text{m}$ Länge auf eine optimale CQ553-Feederlänge von $12,5\text{m}$!

DL1JWD-Doublet-Calculator 2.3

File Devices Antenna Help

Filename: ZS6BKW.ant
 Comment: 5 Resonanzen (SWR < 2)

Tuner: No Tuner
 1:1 Balun: No Balun
 Feeder: CQ553

f(MHz)	SWR	C1(pF)	L(μH)	C2(pF)	Re(Ω)	Xe(Ω)	Ra(Ω)	Xa(Ω)	Transmission	%	dB
1,8	600,81	0,0	0,0	0,0	6,04	-422,81	5,18	-1764,06		0,06	32,37
3,65	7,56	0,0	0,0	0,0	12,66	47,01	26,38	-550,82		29,28	5,33
5,36	40,99	0,0	0,0	0,0	1720,35	-752,46	71,67	31,33		8,87	10,52
7,1	1,05	0,0	0,0	0,0	51,58	1,76	190,88	657,96		92,36	0,35
10,1	231,55	0,0	0,0	0,0	291,8	1814,05	5268,82	8174,42		1,15	19,39
14,15	1,21	0,0	0,0	0,0	44,21	6,97	131,6	-587,28		88,56	0,53
18,1	2,8	0,0	0,0	0,0	62,04	58,7	267,34	726,26		70,94	1,49
21,1	232,18	0,0	0,0	0,0	1120,81	3428,29	10000	10000		1,0	20,0
24,9	1,33	0,0	0,0	0,0	60,12	11,78	178,87	-574,89		88,19	0,55
28,5	1,74	0,0	0,0	0,0	80,14	-18,7	233,65	543,09		85,15	0,7
50	1,98	0,0	0,0	0,0	95,33	-15,48	248,89	496,58		80,56	0,94

Change Length of Feeder

Step (m): 0,5
 Length(m): 12,5

Start

Diagram: PA(50Ωhm) - Feeder (CQ553) Zw = 392Ω, VF = 0,891, 0,74dB/100m(10Mc) - Dipol (2x13,9m) - 12,5m - Ra+jXa

SWR, Re+jXe, Ra+jXa

10 DL1JWD

Bemerkungen:

- Nicht zu übersehen sind die "Stiefkinder" der ZS6BKW-Wunderantenne: die Bänder 160m, 60m, 30m und 15m.
- Wegen des neu hinzugekommenen 60m-Bands erlaubt die Version 2.3 des DZR nun die gleichzeitige Beobachtung von 11, anstatt bisher nur 10 Frequenzen.
- Die geringen Abweichungen zu den vom MRF berechneten SWRs lassen sich auf die im DZR implementierte genauere Berechnung der frequenzabhängigen Kabeldämpfung des CQ553 zurückführen.

Beispiel 2

Einfluss des Speisekabeltyps

Jeder, der von der ZS6BKW-Wunderantenne begeistert ist, wird zwangsläufig von folgender Frage gequält:

Müsste denn eine deutlich verlustärmere Hühnerleiter nicht zu noch besseren Ergebnissen als das halboffene Bandkabel CQ553 führen?

Der MFR gibt eine schockierende Antwort: Alles wird schlechter!

Was trotz hochwertiger Hühnerleiter ($Z_w=600$; $V_F=0,95$; $a=0,16\text{dB}/100\text{m}$ bei 10MHz) als Optimum herauskommt ist lediglich einen symmetrischen Dipol der Spannweite 17,5m mit 11,72m langem Feeder und kläglichen drei Resonanzen (30m, 17m und 12m).

Ähnliche Enttäuschungen kann man auch beim Einsatz anderer gängiger Kabeltypen erleben, wie z.B. bei der halboffenen 300Ohm Bandleitung CQ562flex.

Damit bestätigt der MRF auf mathematischer Basis eine verblüffende These aus [Thilo's Blog](#) :
Die ZS6BKW-Wunderantenne funktioniert nur gut mit halboffenem Bandkabel ähnlich CQ553!

Beispiel 3

Wunderantenne auch mit 160m-Band

Ok, wenn Sie den ZS6BKW-Dipol als T-Antenne betreiben, können Sie auch damit auf 160m-QSOs fahren /1/.

Wer aber über deutlich mehr Platz verfügt, kann sich mit dem MRF auf die Suche nach einer "echten" Wunderantenne begeben, die auch das 160m Band erfasst.

Nach ca. 2 Minuten spuckt das Programm einen OCF-Dipol mit 73,8m Spannweite aus, der bei 30% seiner Gesamtlänge mit 9m CQ553 gespeist wird und es auf sage und schreibe 6 Resonanzen bringt.

Diese finden sich auf den Bändern 160m, 80m, 40m, 15m, 12m und 6m.

Auch das 17m-Band liegt in greifbarer Nähe, leider aber nicht das 20m Band.

Gewissermaßen als "Beifang" geht auch ein "nur" 60m langer symmetrisch gespeister Dipol mit in's Netz, der zwar nur auf 4 Bändern (80m, 40m, 15m, 10m) resonant ist, aber mit $\text{SWR}=3,5$ auch auf 160m noch sehr gut abstimmbare sein dürfte.

Beispiel 4 a

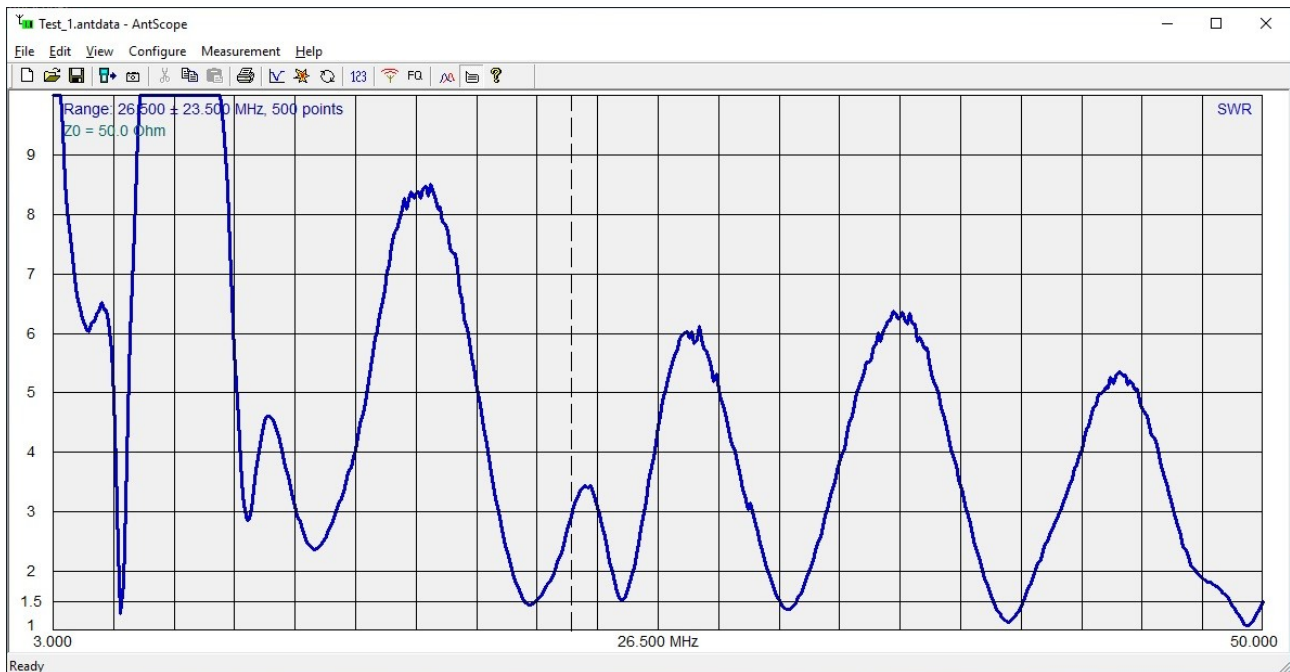
Praktische Messungen

Aufgrund von Umwelteinflüssen oder konstruktiven Besonderheiten (Inverted V) können die Messergebnisse für reale Dipole mehr oder weniger stark von den berechneten Werten abweichen.

Um nachzuweisen, dass sich meine Theorie nicht allzu weit von der Praxis entfernt hat, habe ich deshalb eine vom MRF berechnete 11,9m lange Doppelzepp im Garten in ca. 7m Höhe aufgehängt, sie besteht komplett aus Lautsprecherkabel ($Z_w = 100\Omega$; $VF = 0,7$; $a = 13\text{dB}/100\text{m}$ bei 10MHz, siehe /3/).

Der unsymmetrische Dipol hat einen zufällig ebenso langen Feeder, der ihn bei 30% seiner Spannweite (3,57m) speist. Die vier Resonanzen (SWR < 2) liegen auf dem 20m-, 15m-, 12m- und 6m-Band).

Die SWR-Messungen mit dem Antennenanalysator AA-54 bestätigten in guter Näherung die MRF-Ergebnisse:



Beispiel 4 b

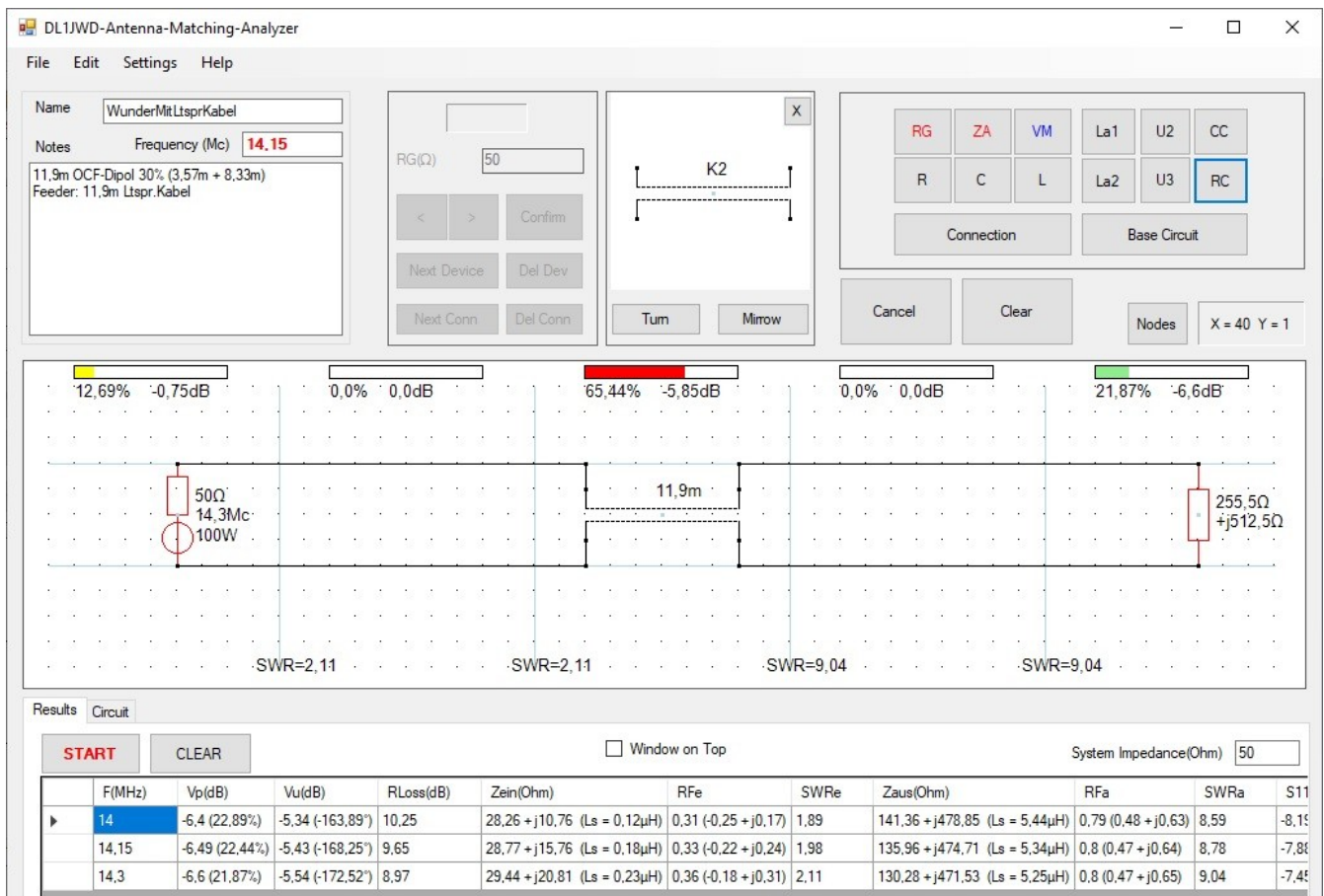
Verlustanalyse mit dem AMA-Tool

Der ausgewogene SWR-Verlauf ab 80m-Band aufwärts ließ die Hoffnung aufkeimen, dass mein Lautsprecherdipol zu Höherem berufen sein könnte und sogar für die nächste Bergtour infrage käme.

Eine Untersuchung mit dem [Antenna-Matching-Analyzer](#) sorgt aber für ein "Blaues Wunder" und schließlich zur Erkenntnis, dass man von dieser Antenne wohl besser die Finger lassen sollte.

Zum Beispiel 20m-Band. Hier wird lediglich ein Wirkungsgrad von 21,8% erreicht, trotz noch akzeptablem $\text{SWR}=2,11$ gehen zwei Drittel (!) der Sendeleistung im Feeder verloren.

Nicht viel besser dürfte es auf den anderen Bändern aussehen (siehe /4/).

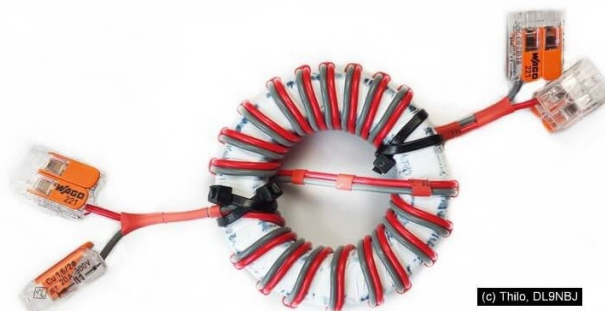


Beispiel 5a

Balun für undefinierte Impedanzen

Wer nicht glücklicher Besitzer eines symmetrischen Antennenkopplers ist, für den bietet sich als "Notlösung" ein so genannter "Balun für undefinierte Impedanzen" an, der zwischen unsymmetrischem Koppler und Feedereingang eingeschleift wird.

Der Wellenwiderstand der Wicklung (zwei Teflon Drähte) beträgt ca. 100Ohm, ansonsten handelt es sich um einen gewöhnlichen 1:1-Strombalun, wie er zur Symmetrierung und Mantelwellenunterdrückung eingesetzt wird.



Als Notlösung muss ein solcher Balun vor allem deshalb gelten, weil damit der Wirkungsgrad der Antenne, im Vergleich zum Einsatz eines symmetrischen Kopplers, deutlich geringer ist.

Das beweist die Simulation mit dem DZR:



Der Balun ist hier mit 1m Lautsprecherkabel gewickelt, dieses hat etwa die gleichen Parameter wie zwei parallele Schaltdrähte.

Das 160m-Band bleibt bei dieser kurzen Antenne natürlich auch für den besten Tuner ein hoffnungsloser Fall.

Für SWR-Gläubige (und die gibt es leider noch immer in übergroßer Mehrheit, wie man täglich auf den Bändern und in den Foren erleben oder in den Büchern von "Antennenexperten" nachlesen kann) sind die perfekten Anpassungsverhältnisse auf allen anderen Bändern in der Regel Anlass zu teils überschwänglicher Euphorie.

Aber überall dort, wo die grünen Balken des DZR ziemlich kurz ausfallen, müssten eigentlich die Alarmglocken läuten.

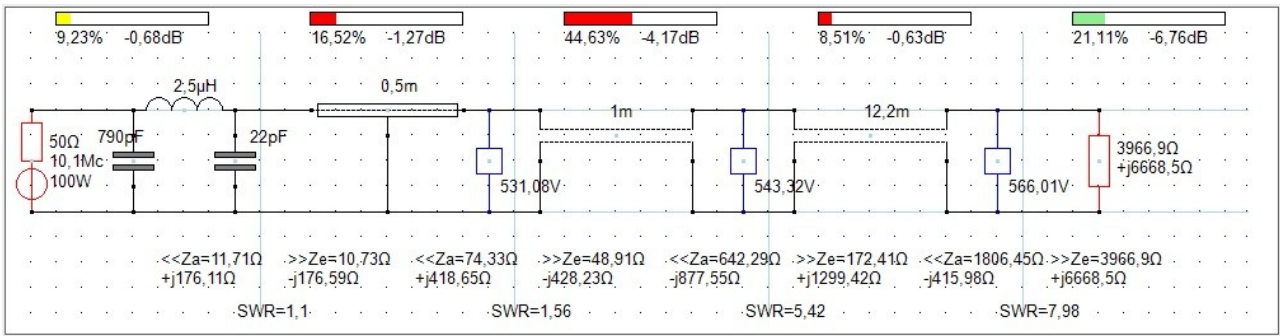
Beispiel 5b

Verlustanalyse

Wegen des auf dem 30m-Band sehr hochohmigen Strahlers schafft es die ZS6BKW-Wunderantenne mit unsymmetrischem Tuner und "Balun für undefinierte Impedanzen" trotz perfekter Anpassung nur auf einen Wirkungsgrad (Transmission) von ca. 30%.

Wo sind die restlichen 70% PA-Leistung geblieben?

Das [AMA-Tool](#) gibt Auskunft:



Der Wirkungsgrad ist ca. 9% geringer als mit dem DZR berechnet, weil ich auch das kurze, nur 50cm langes RG58-Kabel als Verbindung zwischen PA-Ausgang und "Balun für undefinierte Impedanzen" berücksichtigt habe.

Letzterer bleibt mit knapp 45% ein teuer betriebener kleiner Heizofen.

Beispiel 6

ZS6BKW am symmetrischen Antennenkoppler

Um einiges besser sehen die Verhältnisse bei Verwendung eines symmetrischen Antennenkopplers aus, wie zum Beispiel des BX-1200:

DL1JWD-Doublet-Calculator 2.3

File Devices Antenna Help

Filename: ZS6BKW_2.ant
 Comment: ZS6BKW-Wunderantenne mit symmetrischem Tuner

1:1 Balun: RG316U
 Tuner: BX-1200
 Feeder: CQ553

f(MHz)	SWR	C1(pF)	L(μH)	C2(pF)	Re(Ω)	Xe(Ω)	Ra(Ω)	Xa(Ω)	Transmission	%	dB
1.8	7.3	15.0	34.2	15.0	6.04	-422.81	5.18	-1764.06		2.76	15.59
3.65	1.02	15.0	3.65	1255.0	12.66	47.01	26.38	-550.82		69.26	1.6
5.36	1.04	15.0	9.45	85.0	1720.35	-752.46	71.67	31.33		91.12	0.4
7.1	1.01	15.0	0.25	95.0	51.58	1.76	190.88	657.96		90.79	0.42
10.1	1.48	15.0	9.35	35.0	291.8	1814.05	5268.82	8174.42		57.39	2.41
14.15	1.03	65.0	0.1	15.0	44.21	6.97	131.6	-587.28		87.21	0.59
18.1	1.05	15.0	0.55	155.0	62.04	58.7	267.34	726.26		88.43	0.53
21.1	1.03	115.0	4.55	15.0	1120.81	3428.29	10000	10000		51.41	2.89
24.9	1.02	15.0	0.2	75.0	60.12	11.78	178.87	-574.89		86.92	0.61
28.5	1.1	15.0	0.25	35.0	80.14	-18.7	233.65	543.09		88.27	0.54
50	1.12	15.0	0.2	25.0	95.33	-15.48	248.89	496.58		85.58	0.68

Change Length of Feeder
 Step (m): 0.1
 Length (m): 12.5

Start

SWR: 1m
 Re+jXe
 Ra+jXa

10 DL1JWD

Hinweis:

Leider erlaubt der DZR auf direktem Weg nur die Berechnung symmetrischer Dipole. Außermittigt gespeiste Dipole, wie sie der *MultiResonanceFinder* ebenfalls anbietet, könnten aber unter Einbindung des [OCF-Dipol-Calculator](#), mit dem man zunächst die Fußpunktimpedanzen ermittelt, ebenfalls berücksichtigt werden.

Zur Theorie

Der *MultiResonanceFinder* MRF setzt sich aus verschiedenen Bausteinen des Programms [HamVNAS](#) zusammen, wie sie zum Beispiel auch in [Kabelrechner](#), [Antenna-Matching-Analyzer](#), [OCF-Calculator](#) oder [Doppelzepprechner](#) zur Anwendung kommen.

Näheres zum theoretischen Background findet man in den Info-PDFs, die diesen Tools jeweils beigelegt sind.

Die ZS6BKW entstand aus der berühmten G5RV Antenne, die von Louis Varney, Ende der 1940er Jahre erfunden wurde. Er hatte sich die interessante mathematische Aufgabe gestellt: Wie lang müssen Dipol und Feeder sein, damit maximal viele Resonanzen auf den Afu-Bändern auftreten? Brian Austin, ZS6BKW, hat dann die G5RV unter Einbeziehung der WARC-Bänder weiterentwickelt.

Es dürfte klar sein, dass eine experimentelle Lösung aufgrund der unendlichen Vielzahl von Kombinationen zum Scheitern verurteilt war. Kein Zufall also, dass er seine Antenne erst mit Anbruch des PC-Zeitalters in den 1980er Jahren präsentieren konnte.

Diese Antenne ist (insbesondere bei beengten Platzverhältnissen) viel zu zu interessant, um ignoriert zu werden:

- das CQ553-Bandkabel ist optisch weit weniger auffällig als eine Hühnerleiter, gut für den Frieden mit der Nachbarschaft!
- die Gesamtlänge des Dipols ist nur 27,5m, gut für kleine Grundstücke!
- ein symmetrischer Tuner ist nicht erforderlich, stattdessen "Balun für undefinierte Impedanzen", gut für den Geldbeutel!
- 5 Eigenresonanzen auf den Afu-Bändern, gut für den Wirkungsgrad!

Fazit:

Das MRF-Tool bietet beste Voraussetzungen, um Anwendungslücken der ZS6BKW-Wunderantenne zu füllen und sich mit eigenen Versionen in das Abenteuer Antennenbau zu stürzen.

Viel Spaß und 73

de Walter dl1jwd.darc.de.

Literatur und Bezugsquellen

[1] Th. Sauer, DL9NBJ: "ZS6BKW Antenne – Wunderantenne für 5 Bänder ohne Traps"

<https://www.dl9nbj.de/zs6bkw-antenne/>

[2] U. Neibig, DL4AAE: "Dämpfung und Verkürzungsfaktor von Zweidrahtleitungen", FUNKAMATEUR 11/16

[3] W. Doberenz, DL1JWD: "Dipol und Feed aus Lautsprecherkabel", CQ DL 3/17

[4] W. Doberenz, DL1JWD: "SWR gut - alles gut?", CQ DL 4/19

[5] K. Kark, "Antennen und Strahlungsfelder", Vieweg Verlag 2004