

Simulations- und Messmethode zur Bestimmung des Wirkungsgrades einer Antenne unter Berücksichtigung der Bodenverluste und aller anderen Verluste

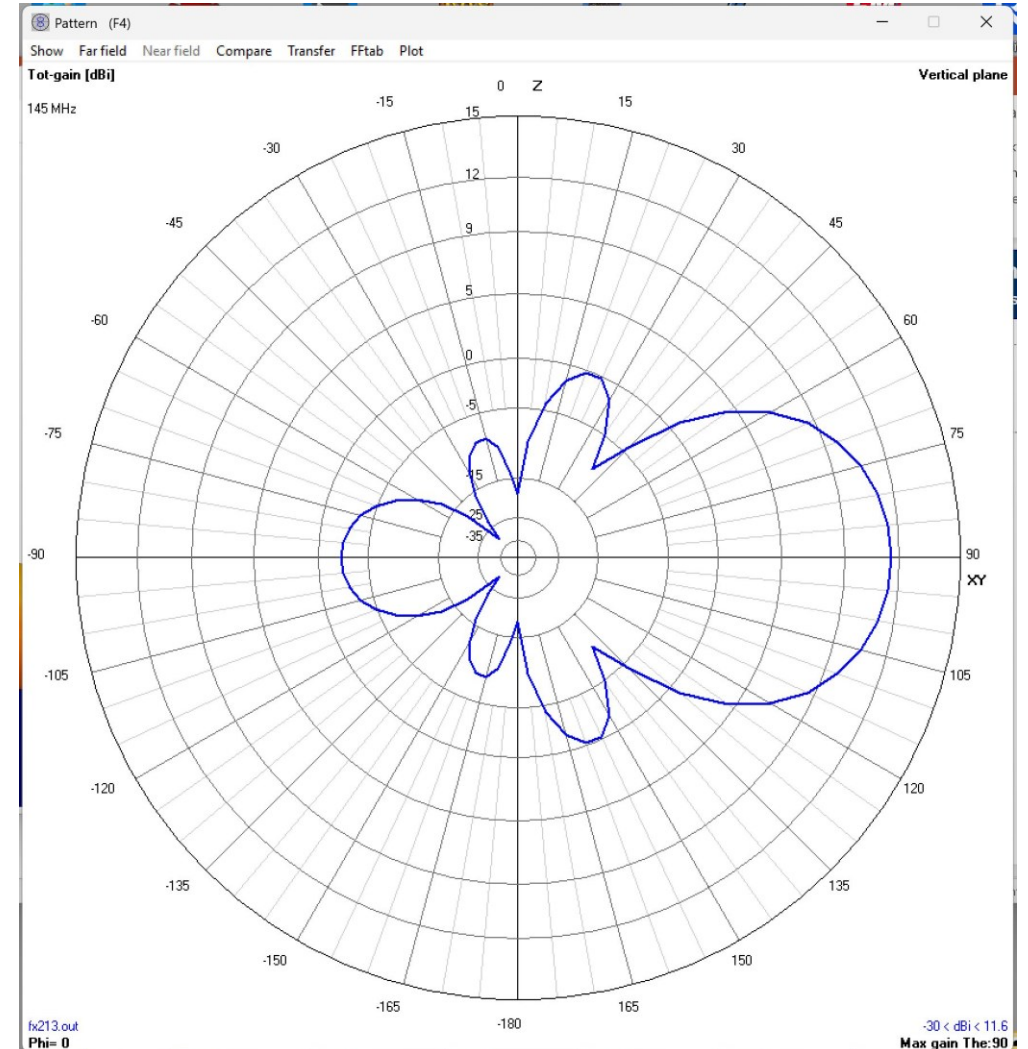
1. Simulation

Simulationen mit EZNEC pro/4+ v.7.0 mit ext. NEC5-Maschine,
AutoEZ von AC6LA, Dan Maguire, 4NEC2

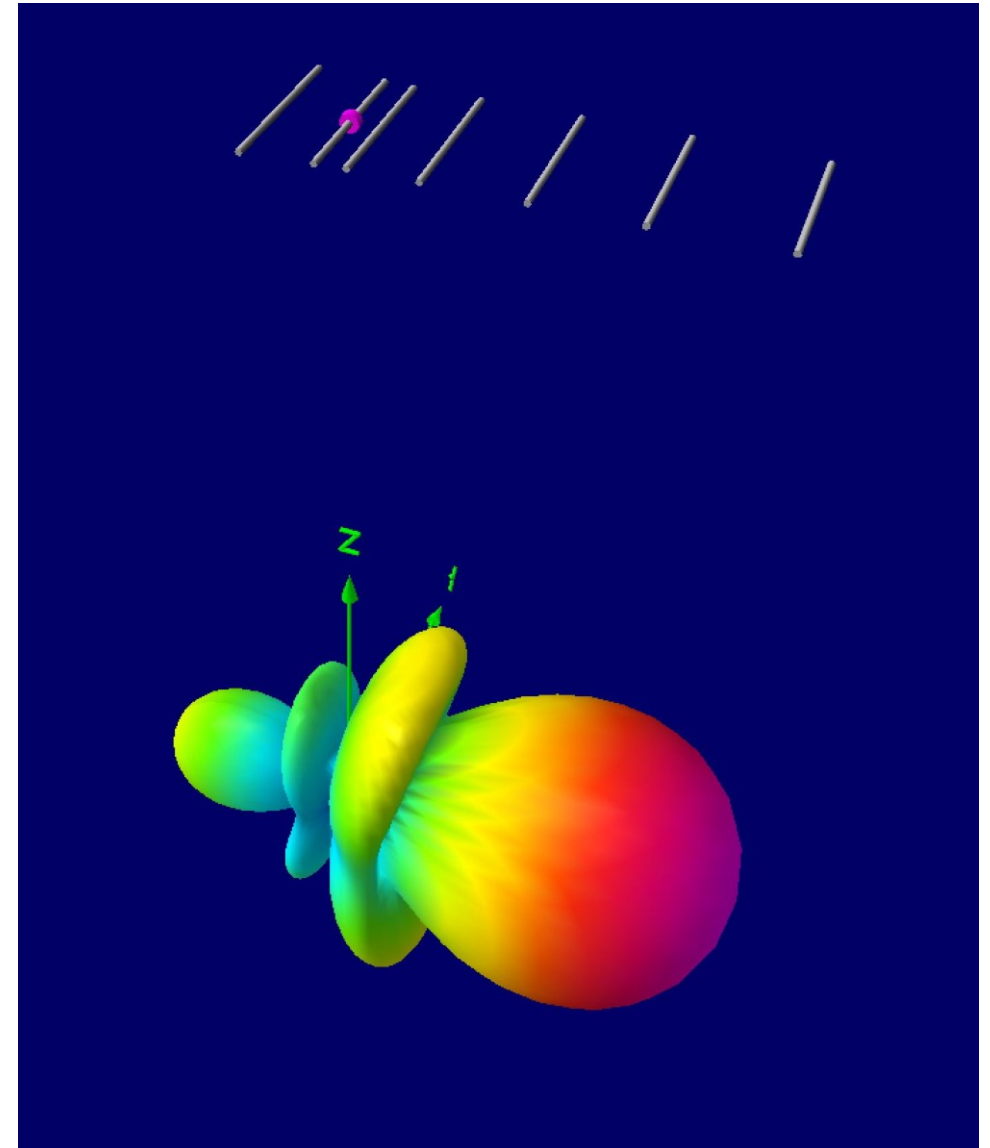
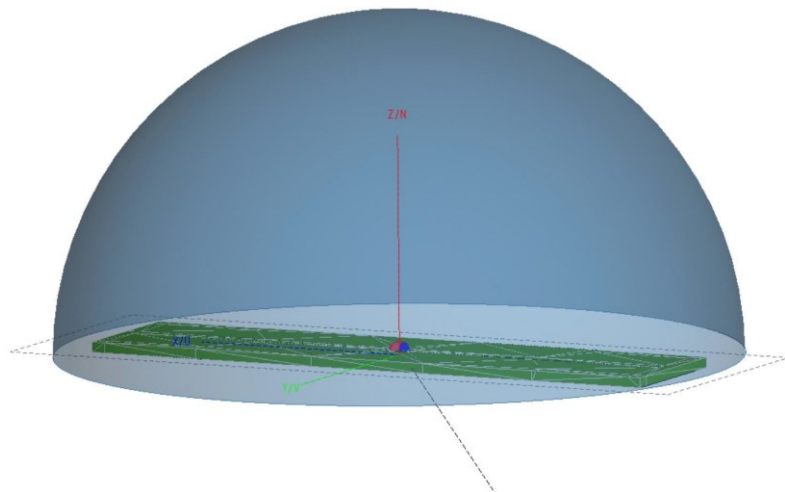
Begriffsklärungen:

- **Antennengewinn (gain)**
- **durchschnittlicher Gewinn AVG (average gain)**
- **Average Gain Test AGT**

Der **Gewinn (gain)** gibt an, um wieviel die Energiedichte in Hauptstrahlrichtung größer ist als die bei einer Referenzantenne, wenn beide Antennen dieselbe Leistung zugeführt bekommen. Die Referenzantenne ist entweder ein (theoretischer) Isotroper Strahler (dBi) oder ein Dipol (dBd). Der Gewinn gilt auch reziprok im Empfangsfall.



Der „**average gain**“ ist das Verhältnis der in einer Hemisphäre, oder im Freiraum einer Sphäre, abgestrahlten Gesamtenergie (mit allen Nebenzipfeln) zur zugeführten Energie. Er bildet also den Wirkungsgrad der Antenne inklusive der Boden- und Drahtverluste ab und ist immer <1 oder $<100\%$

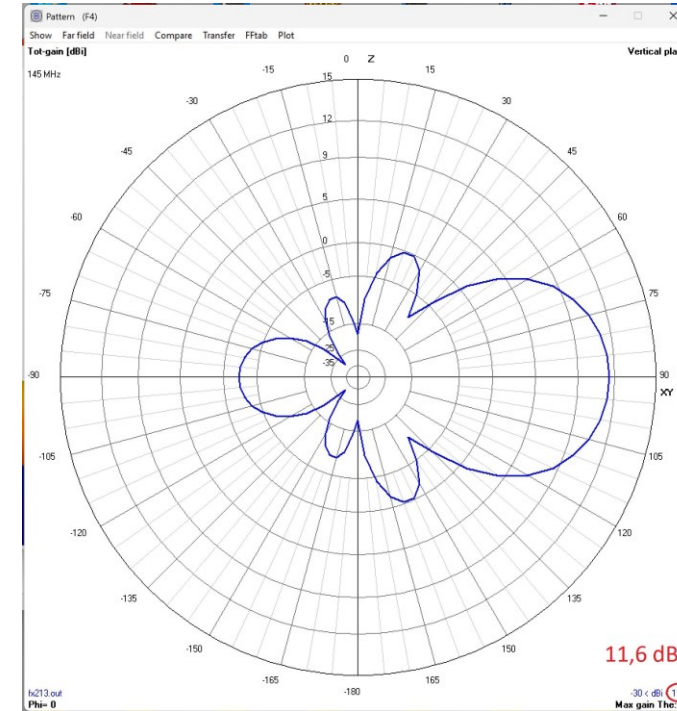
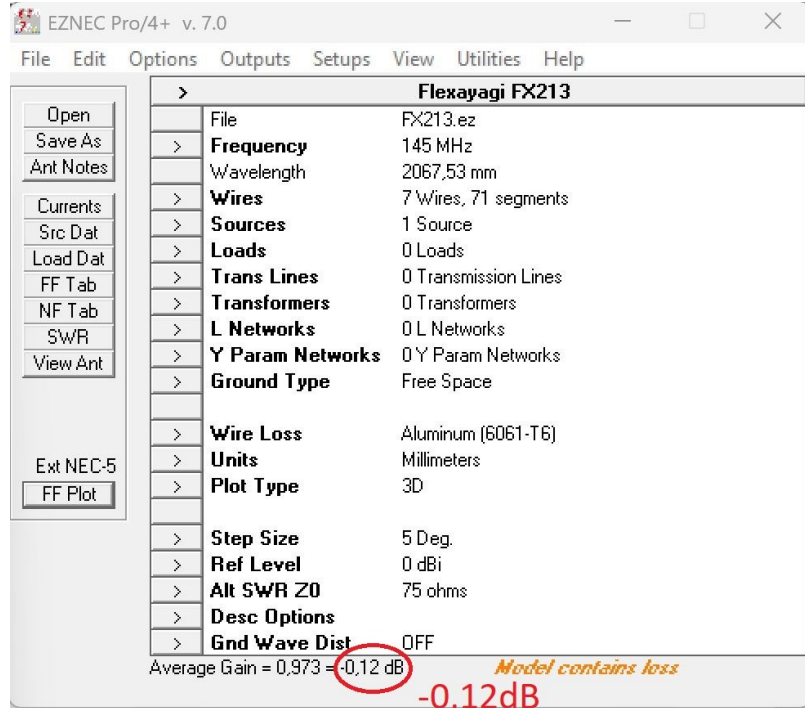


Was ist der **Average Gain Test** (z.B. bei 4NEC2 und autoEZ) ?

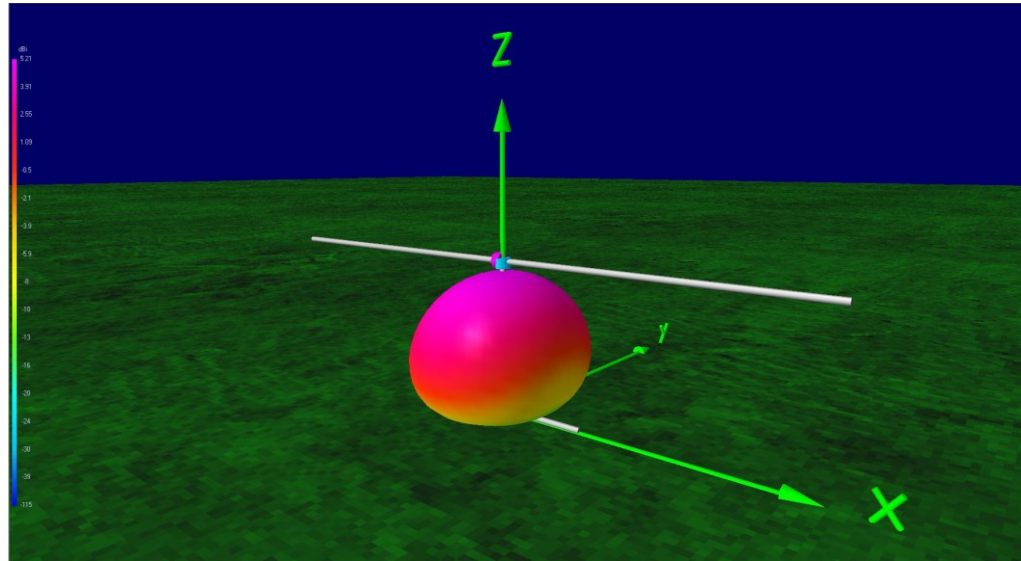
Dieser Test wird zum Verifizieren des Modells verwendet. Hierzu müssen alle Verluste, wie Drahtverluste und Bodenverluste abgeschaltet werden. Also Rechnung im „free space“ oder über idealem Boden und ohne „Wire loss“.

Nun muss der AVG möglichst zwischen 0,95 und 1,05 oder $<|\pm 0,2|$ dB liegen! Dies weist auf ein korrektes Modell und korrekte Segmentierung hin oder auf gute Konvergenz.

Abweichungen von mehr als $\pm 0,4$ dB erfordern eine Korrektur des Modells!



Eine 7-Element 2m-Yagi, hat z.B. einen Gewinn von +11,6dBi oder +9,5dBd und gleichzeitig einen AVG von -0,12dB im „free space“, also ohne Erdverluste. Der Wert müsste ideal ± 0 dB betragen. Das bedeutet, dass die Modellierung korrekt ist. Dies ist nur ein Beispiel zur Veranschaulichung, auf Kurzwelle sieht die Sache anders aus...



Main [V5.9.2] (F2)

File Edit Settings Calculate Window Show Run Help

Filename: dipol_simpel.out Frequency: 7.1 Mhz
Wavelength: 42.23 mtr

Voltage: 75.8 + j0 V Current: 1.32 - j0.22 A

Impedance: 55.9 + j9.5 Series comp.: 2359 pF
Parallel form: 57.5 // j338 Parallel comp.: 66.35 pF

S.W.R. 50: 1.23 Input power: 100 W
Efficiency: 97.89 % Structure loss: 2.112 uW
Radiat.-eff.: 50.07 % Network loss: 0 uW
RDF [dB]: 8.12 Radial-power: 97.89 W

Environment: Loads Polar

GROUND PLANE SPECIFIED.
WHERE WIRE ENDS TOUCH GROUND, CURRENT WILL BE INTERPOLATED.
FINITE GROUND - SOMMERFELD SOLUTION
RELATIVE DIELECTRIC CONST. = 13.000
CONDUCTIVITY = 5.000E-03 MHOS/METER
COMPLEX DIELECTRIC CONSTANT = 1.30000E+01-1.26588E+01

Comment:
EZNEC Pro/4+ v. 7.0.1 2023-06
EZNEC Pro/4+ v. 7.0.3 2025-02-01 11:43:42

Seg's/patches	start	stop	count	step
80				
Pattern lines	Theta -90	90	37	5
Freq/Eval steps	Phi 0	360	73	5
Calculation time	0.090 s			

EZNEC Pro/4+ v. 7.0

File Edit Options Outputs Setups View Utilities Help

EZNEC Pro/4+ v. 7.0.1 2023-06

- File: Dipol_ohne_BalUn.ez
- Frequency: 7.1 MHz
- Wavelength: 42,2243 m
- Wires: 1 Wire, 80 segments
- Sources: 1 Source
- Loads: 0 Loads
- Trans Lines: 0 Transmission Lines
- Transformers: 0 Transformers
- L Networks: 0 L Networks
- Y Param Networks: 0 Y Param Networks
- Ground Type: Real/Extended Accuracy
- Ground Descrip: 1 Medium (0,005, 13)
- Wire Loss: Copper
- Units: Meters
- Plot Type: 3D
- Step Size: 5 Deg.
- Ref Level: 0 dBi
- Alt SWR Z0: 75 ohms
- Desc Options: OFF
- Gnd Wave Dist: OFF

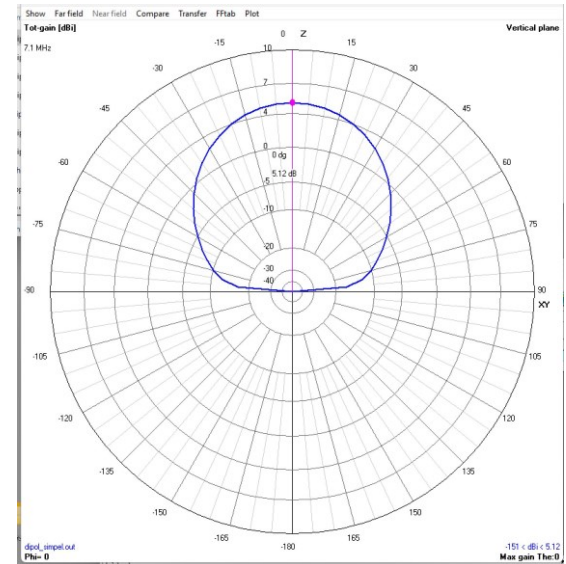
Average Gain = 0,501 **-3,01 dB** Model contains loss

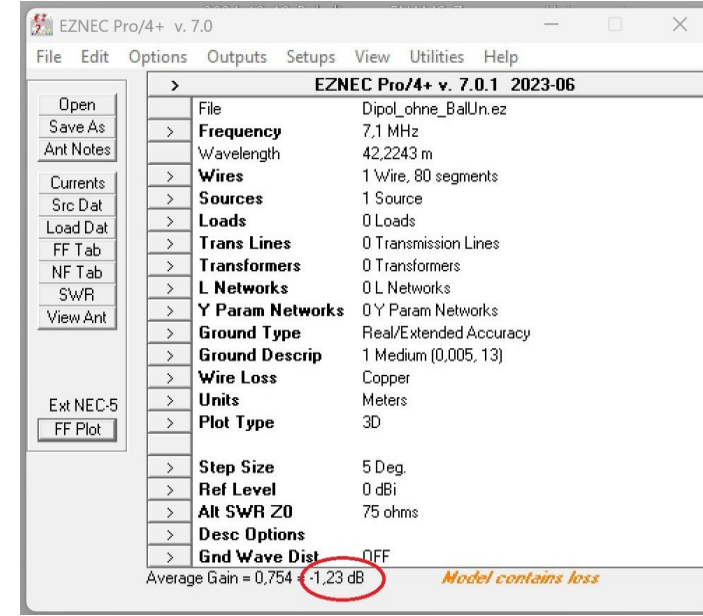
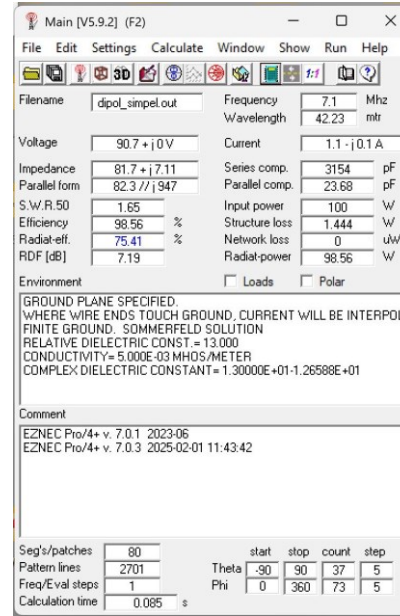
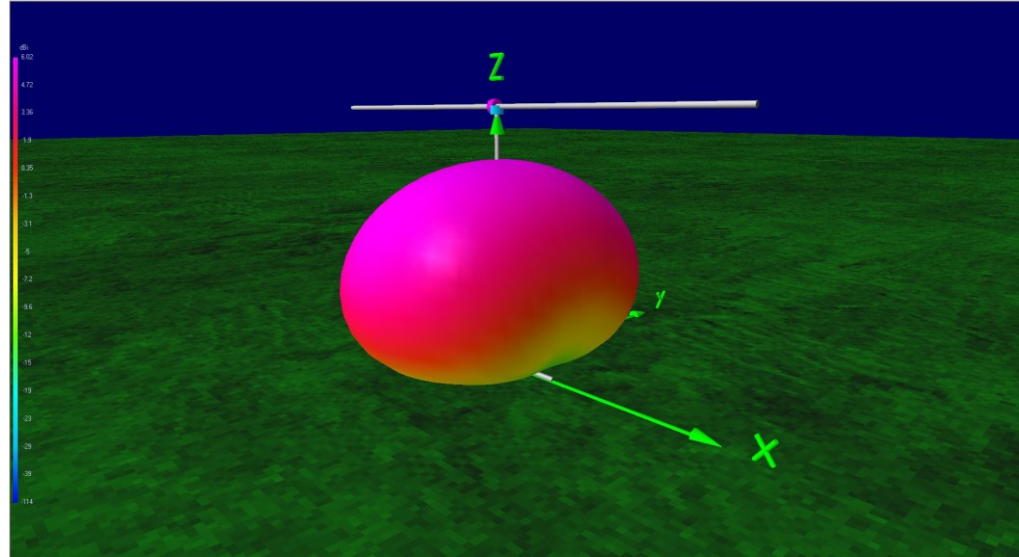
**40m Dipol
5m über
gnd, Gain
= +5,1dBi**

Ein 40m Dipol wurde mit realem Boden (0.005 / 13) in 5m Höhe mit 4NEC2 und EZNEC7 mit NEC5 Maschine simuliert. Bei 4NEC2 muss man rechnen:

$$AVG = 10 * \log \left(\frac{eff}{100} \right) \text{ in dB}$$

5m Höhe: Eff = 50,1% oder
AVG = -3dB mit NEC5



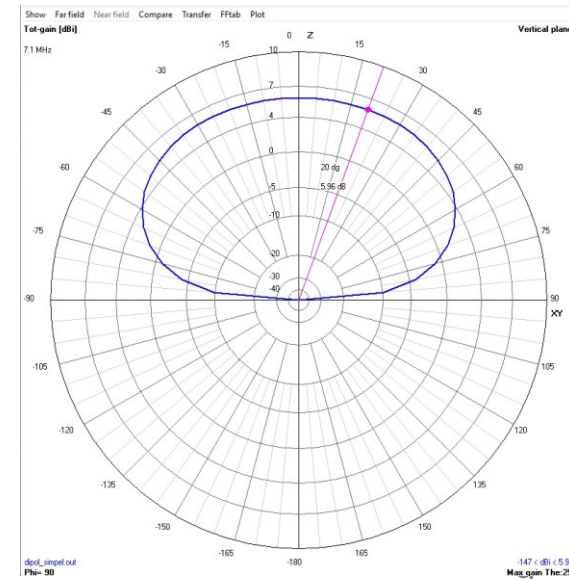


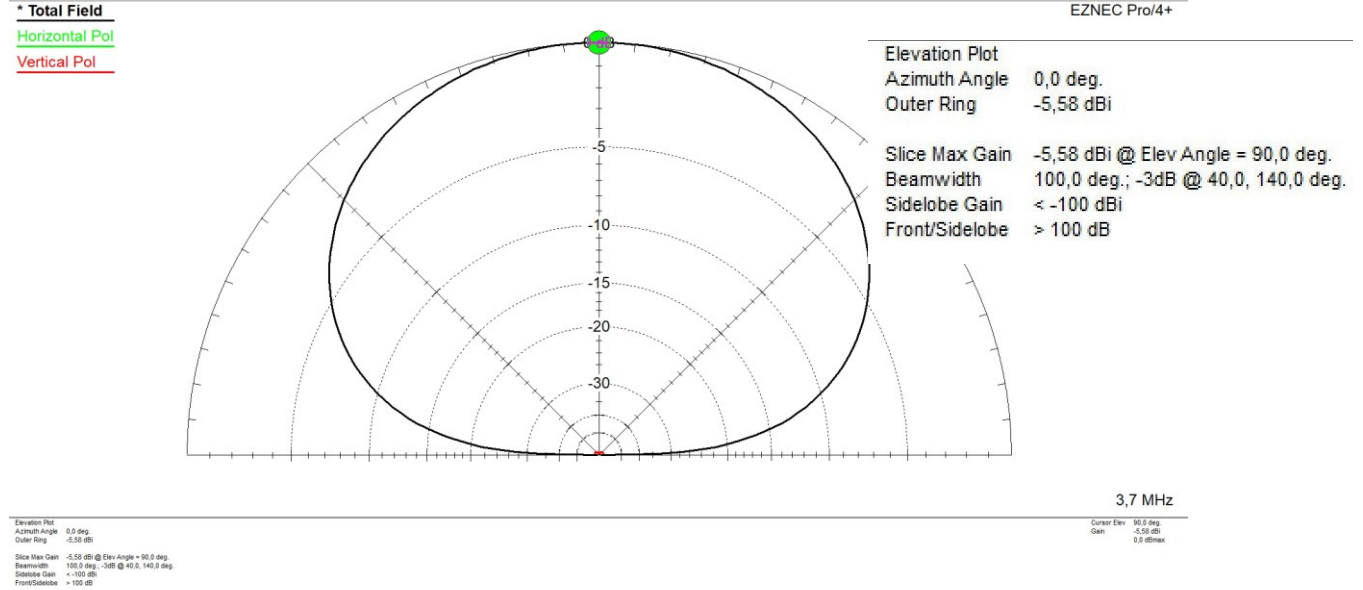
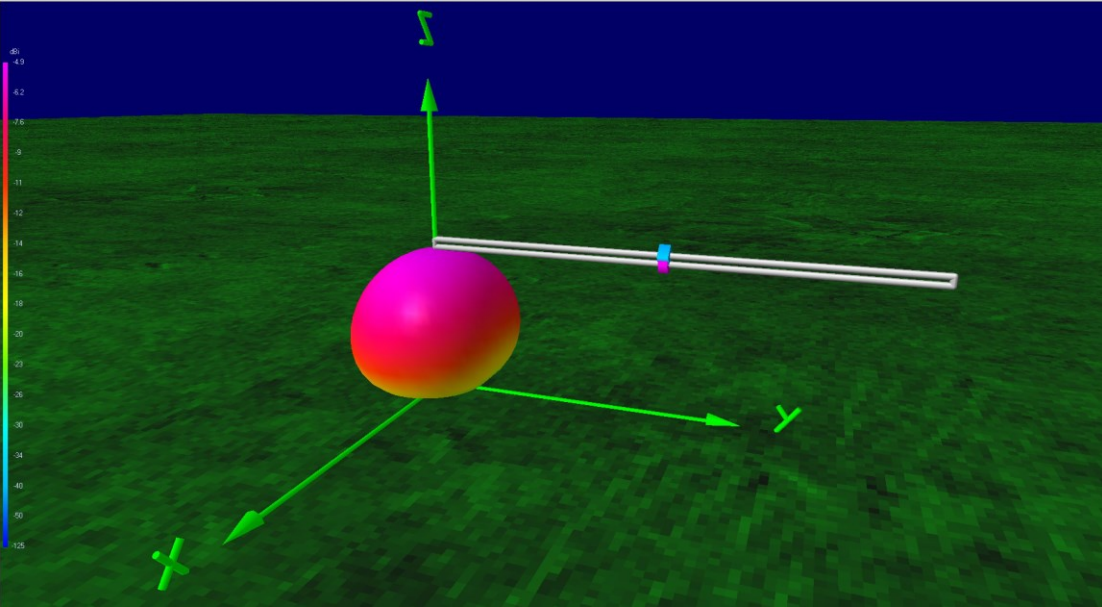
**40m Dipol
10m über
gnd, Gain
= +6 dBi**

Ein 40m Dipol wurde mit realem Boden (0.005 / 13) in 10m Höhe mit 4NEC4 und EZNEC7 mit NEC5 Maschine simuliert. Bei 4NEC2 muss man rechnen:

$$AVG = 10 * \log\left(\frac{eff}{100}\right) \text{ in dB}$$

10m Höhe: Eff = 75,4% oder AVG = -1,2dB mit NEC5.
Die Erhöhung des Dipols von 5m auf 10m bringt bereits ca. 1,7dB Verbesserung aufgrund der Bodenverluste!



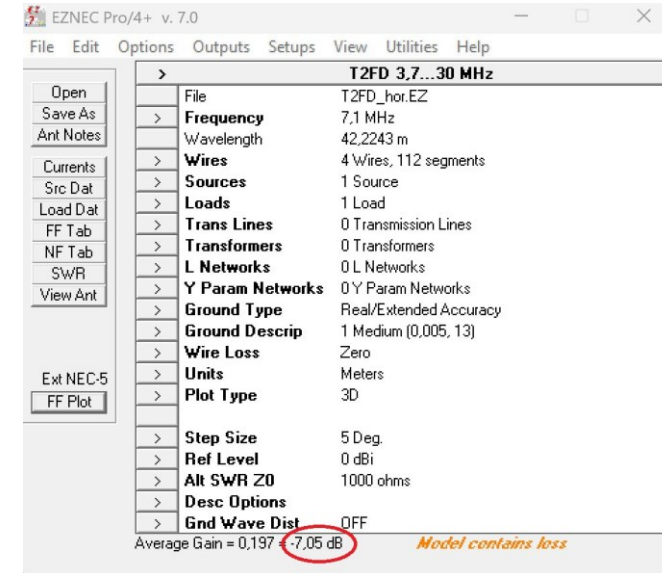
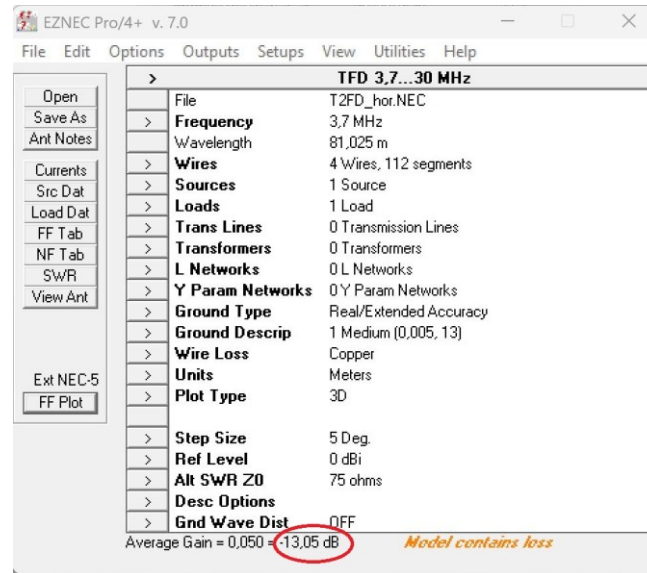


Eine 30m lange TFD-Antenne wurde mit realem Boden (0.005 / 13) auf 80 u. 40m mit EZNEC7 mit NEC5 simuliert.

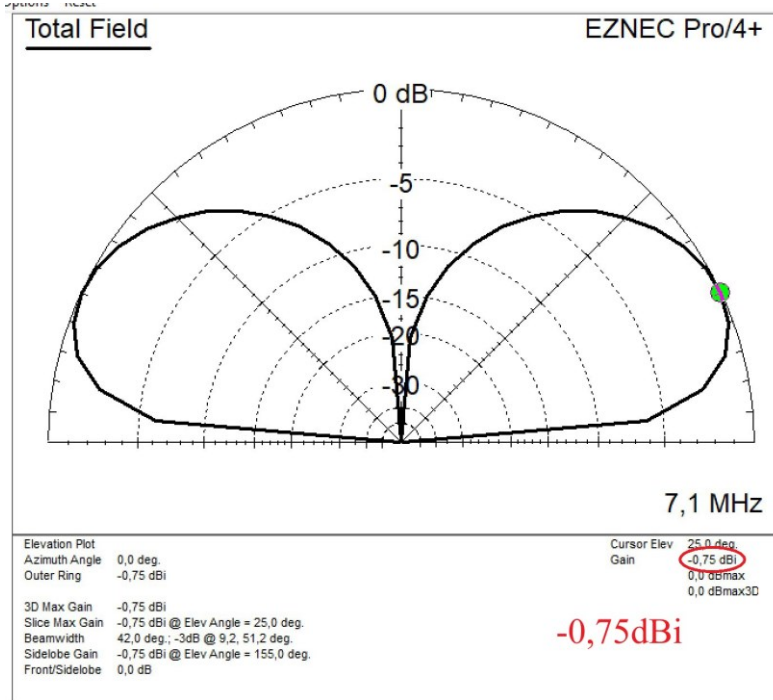
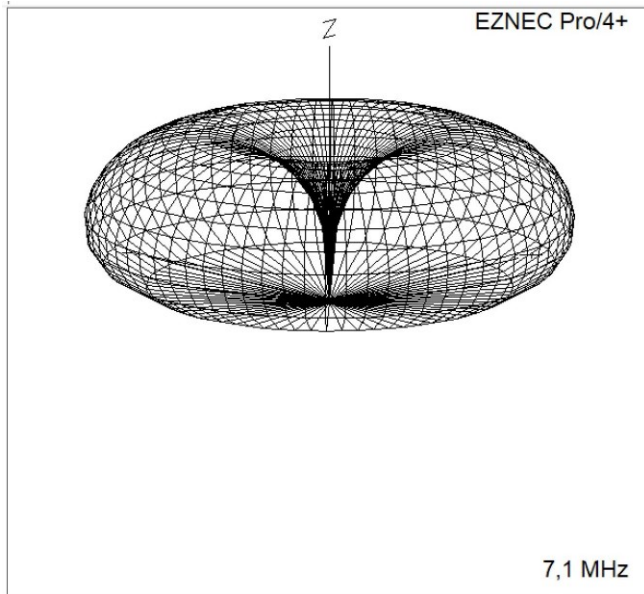
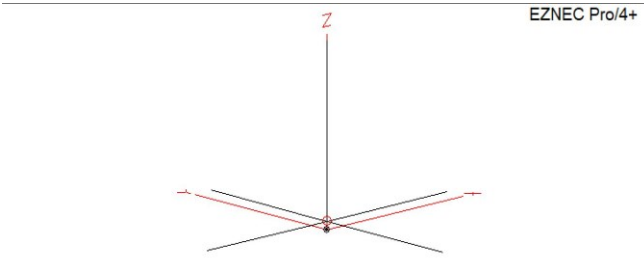
10m Höhe:

80m: AVG = -13,1dB, Gain = -5,6dBi

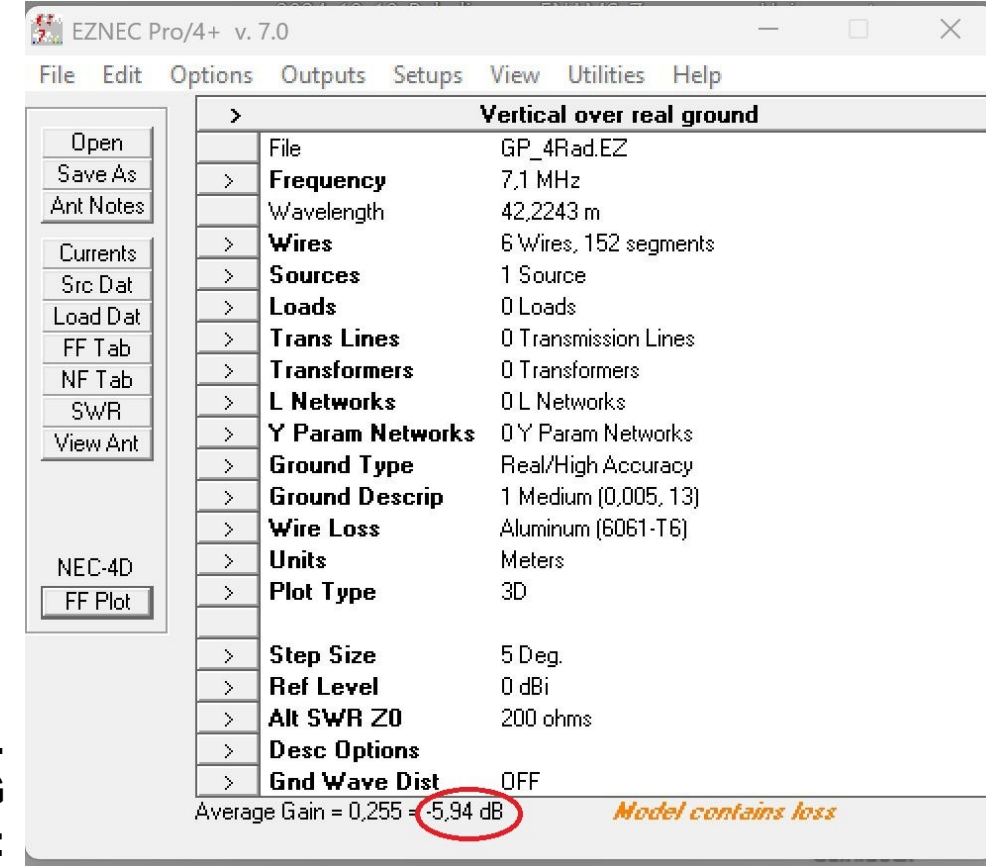
40m: AVG = -7,1dB, Gain = +1,3dBi



Beispiel Groundplane für 7,1MHz mit 4 Radials:



Groundplane mit 4 Radials 0,5m ü.Gnd. auf „average ground“ hat -5,9dB AVG und -0,8dBi gain. Theoretischer gain: 2,1dBi + 3dB = +5.1dBi. Unterschied: 0,8 + 5,1 = 5,9dBi = AVG !



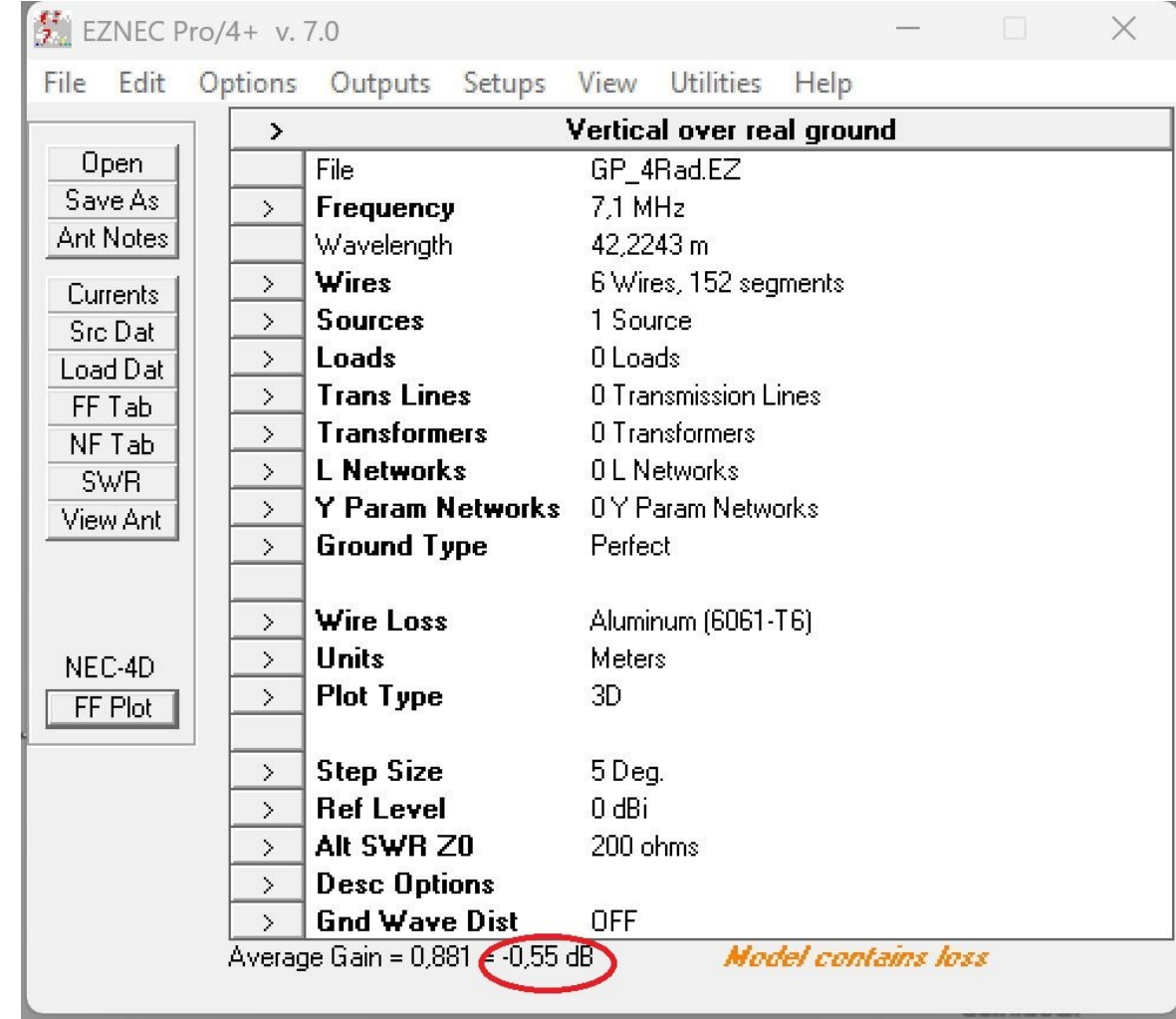
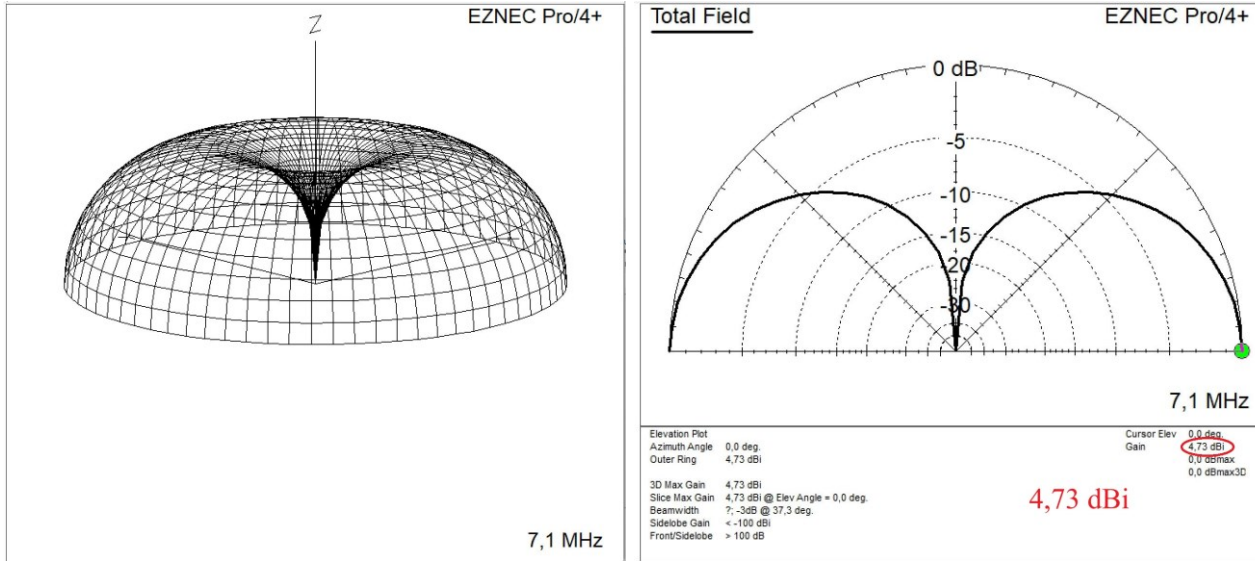
EZNEC Pro/4+ v. 7.0

File Edit Options Outputs Setups View Utilities Help

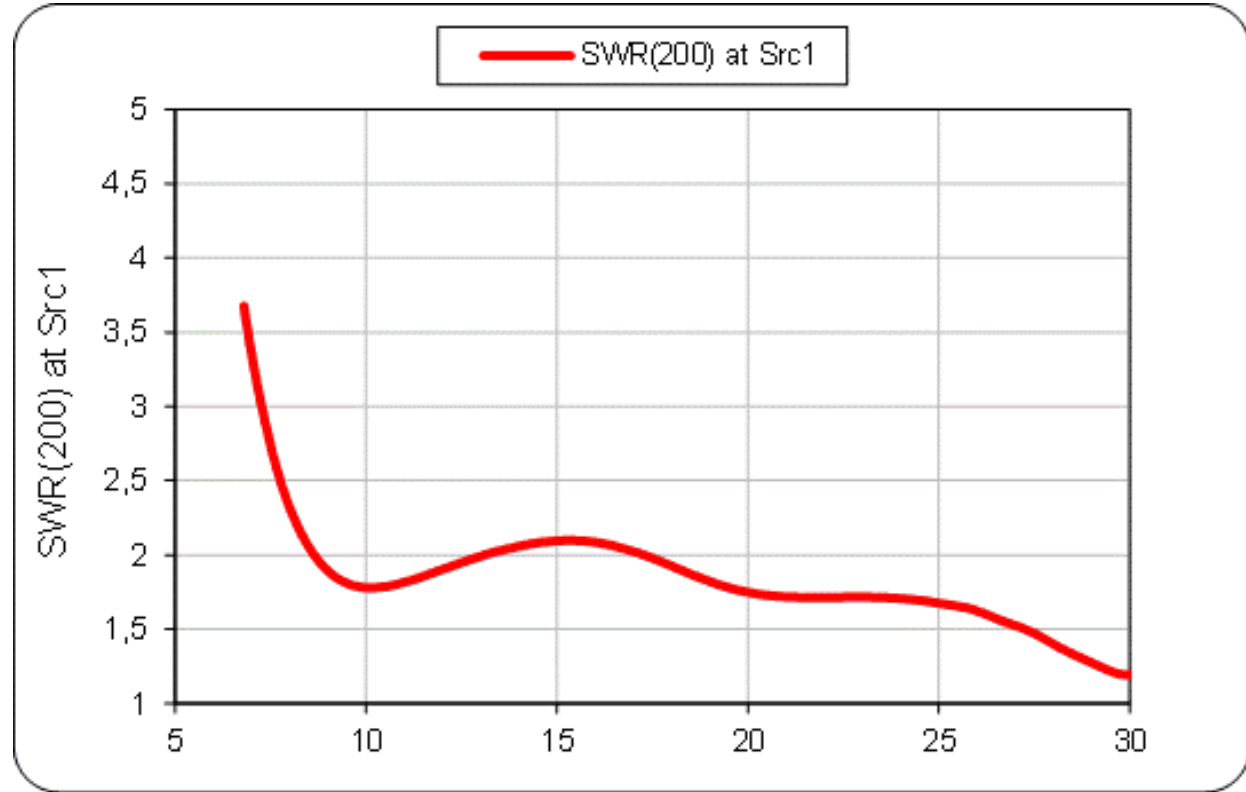
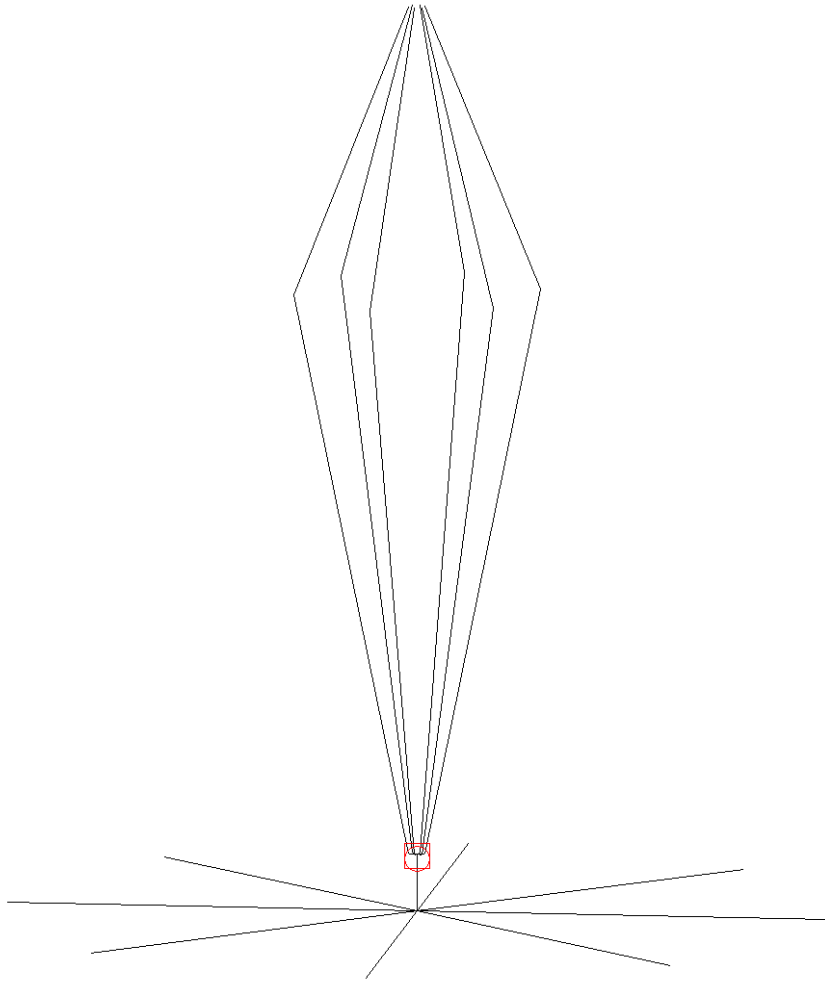
Vertical over real ground

File	GP_4Rad.EZ
Frequency	7,1 MHz
Wavelength	42,2243 m
Wires	6 Wires, 152 segments
Sources	1 Source
Loads	0 Loads
Trans Lines	0 Transmission Lines
Transformers	0 Transformers
L Networks	0 L Networks
Y Param Networks	0 Y Param Networks
Ground Type	Real/High Accuracy
Ground Descrip	1 Medium (0,005, 13)
Wire Loss	Aluminum (6061-T6)
Units	Meters
Plot Type	3D
Step Size	5 Deg.
Ref Level	0 dBi
Alt SWR Z0	200 ohms
Desc Options	
Gnd Wave Dist	OFF

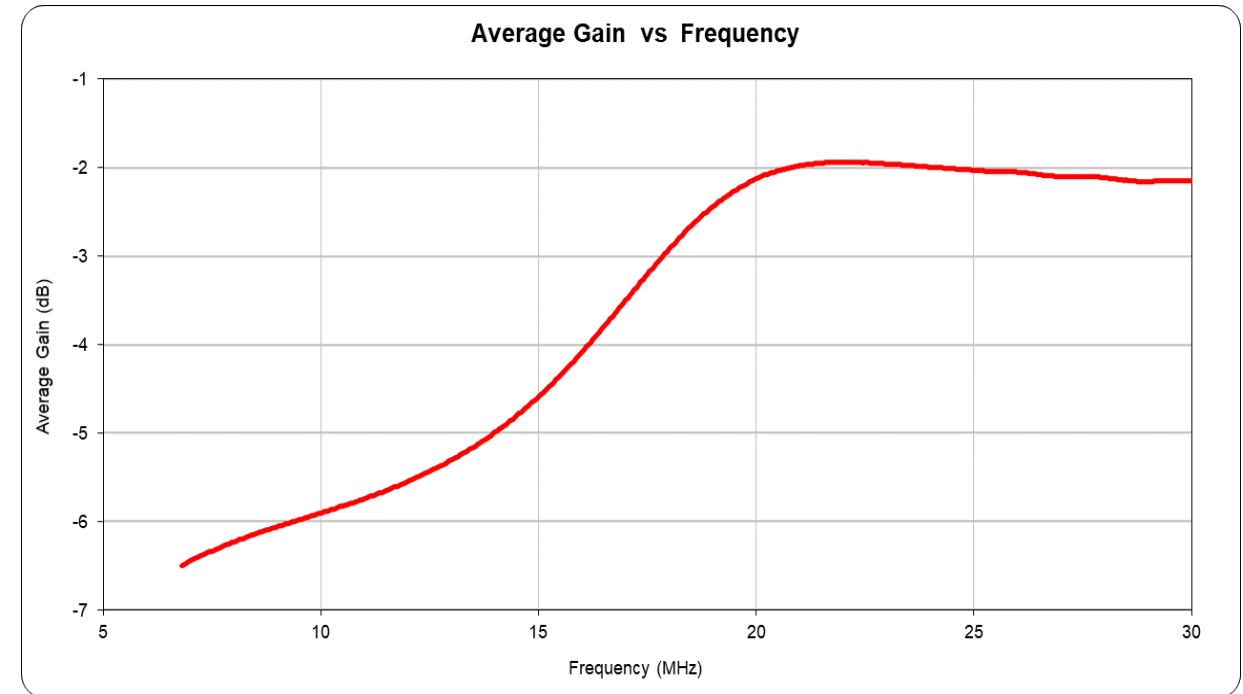
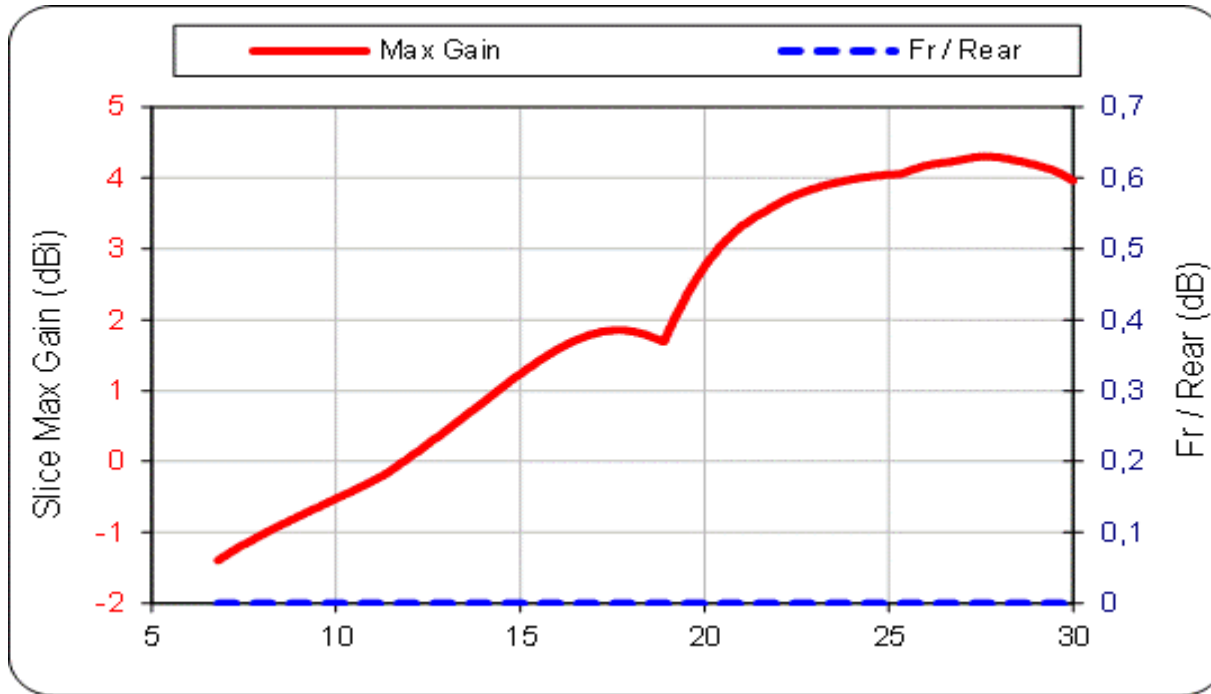
Average Gain = 0,255 = -5,94 dB *Model contains loss*



Über idealem Boden (sehr große Metallplatte) ist der AVG von -5,9dB auf -0,6dB, also um 5,3dB gestiegen, der gain ist von -0,8dBi auf +4,7dB, also um 5,5dB gestiegen. Die Bodenverluste sind entfallen und die Drahtverluste geblieben.

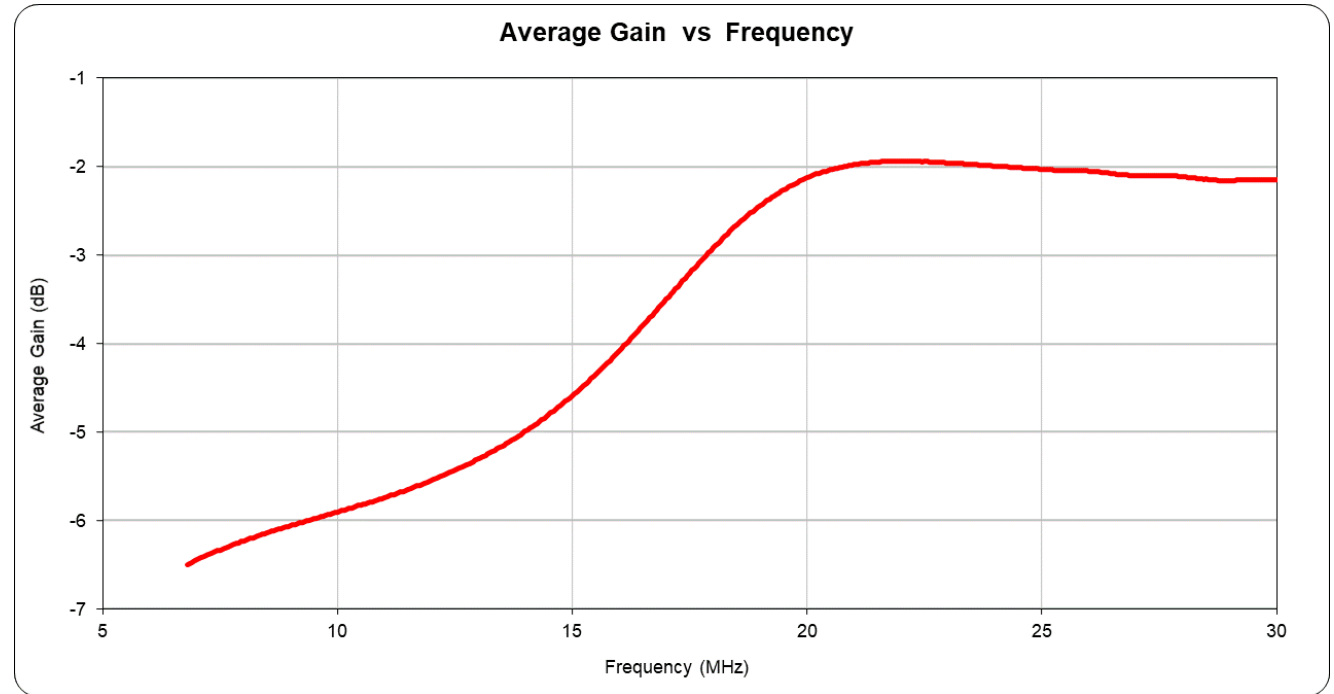
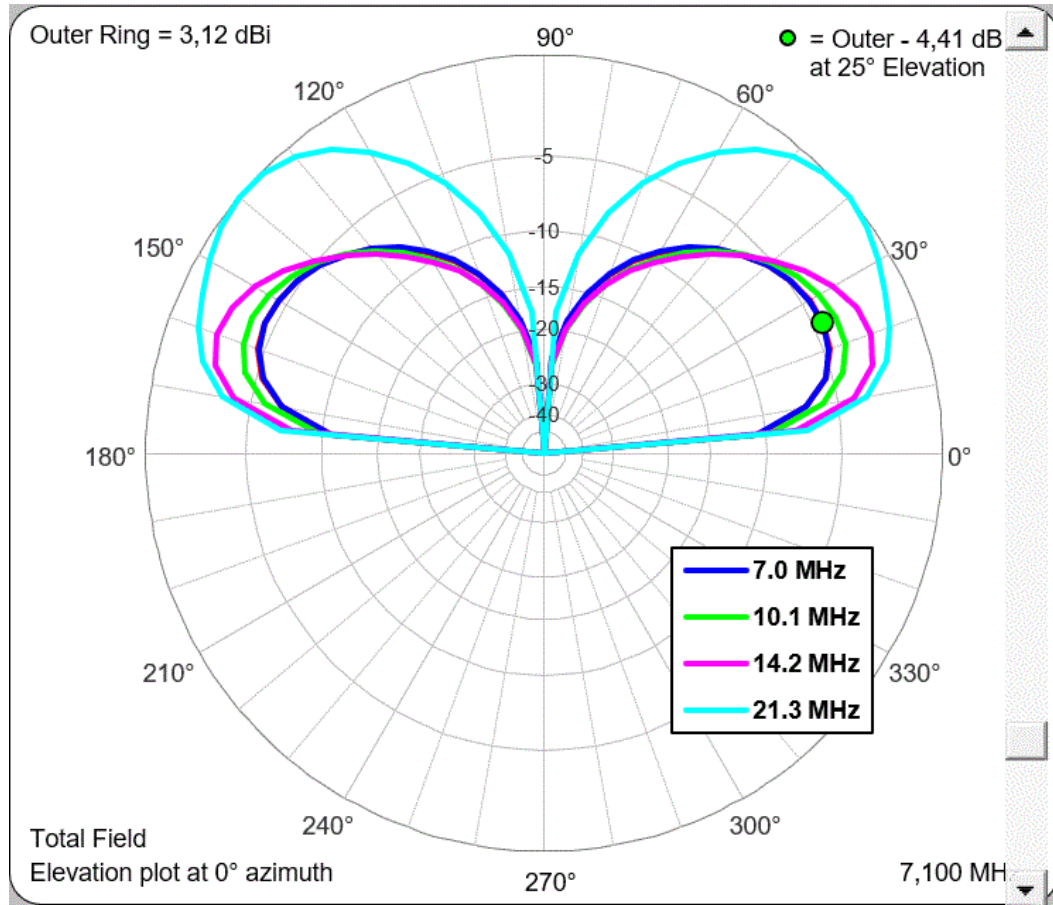


Reuse 10m hoch mit Radials (siehe Funkamateureur 1/25) 7MHz ... 30MHz



Der Gain-Verlauf und der AVG-Verlauf der Reuse

Bei tiefen Frequenzen zeigt sie das normale Verhalten einer $\lambda/4$ Groundplane, ab etwa 20MHz das eines hoch aufgehängten Dipols!



**Der AVG steigt, wenn das Diagramm abhebt.
Weniger Bodenverluste!**

Beurteilung einer Antenne durch den AVG

Der AVG stellt den Wirkungsgrad einer Antenne dar. Wieviel von der zugeführten Energie wird von der Antenne insgesamt abgestrahlt.

Das Diagramm ist aber der zweite wichtige Parameter der Antenne: wohin wird die Energie abgestrahlt?

Elevation: Flacher Abstrahlwinkel? Steiler Abstrahlwinkel?

Azimuth: die richtige Richtung zum Funkpartner?

Bei stark bündelnden Antennen (Yagi, Spiegel) spielt der AVG eine geringere Rolle. Er ist wichtig bei Antennen, die bezogen auf die Wellenlänge, erdnah betrieben werden.

2. Messung

Messung des AVG zum Vergleich verschiedener Antennen

Da man schlecht die abgestrahlte Energie in einer ganzen Hemisphäre messen kann, geht man den umgekehrten Weg!

Gibt es in einer Hemisphäre schon HF-Energie für eine reziproke Messung?

Ja, Weltraumrauschen!

Annahme:

Das Weltraumrauschen kommt aus allen Raumrichtungen gleich stark polarisationsneutral homogen verteilt herein.

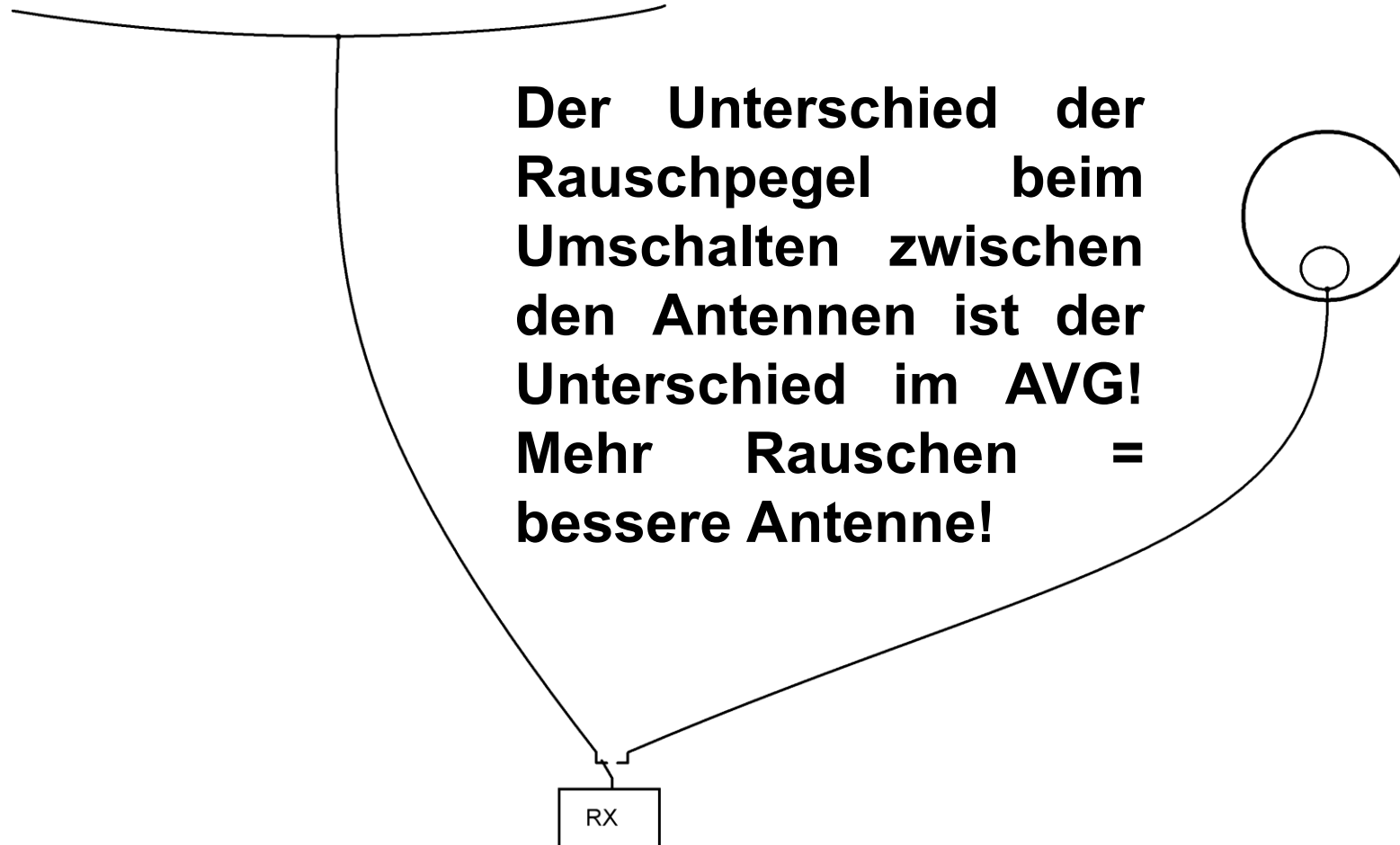
Das stimmt leider nicht ganz! Es gibt auch Rauschen mit ionosphärischer Ausbreitung von weit entfernten Quellen! Trotz geringer Inhomogenitäten ist die Rauschverteilung noch hinreichend gut.

Voraussetzung:

Die Messung muss möglichst weit entfernt von künstlichen Rauschquellen (man made noise) gemacht werden! Keine Störquellen in der Umgebung!

Die einfachste Messung ist der Vergleich zweier Antennen.

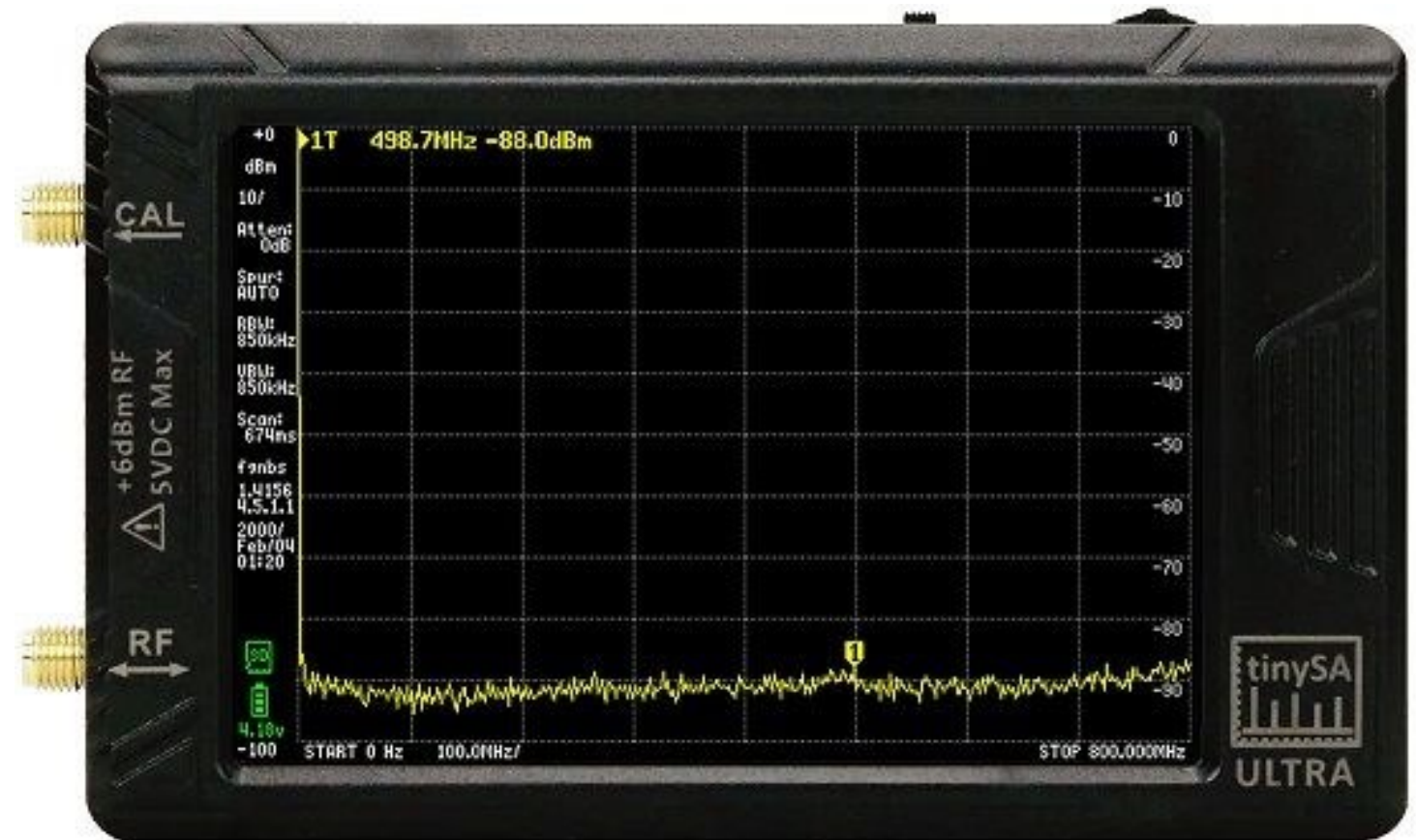
Die zu vergleichenden Antennen müssen so angeordnet sein, dass sie möglichst wenig verkoppeln oder sie müssen wechselseitig verstimmt oder kurzgeschlossen werden. Das Rauschen ist sehr schwach, sodass eventuell ein rauscharmer Vorverstärker nötig wird. Test: Trennen vom und wieder Verbinden jeder der beiden Antennen mit dem RX muss einen deutlichen Rauschunterschied bewirken (auf freier Frequenz)!



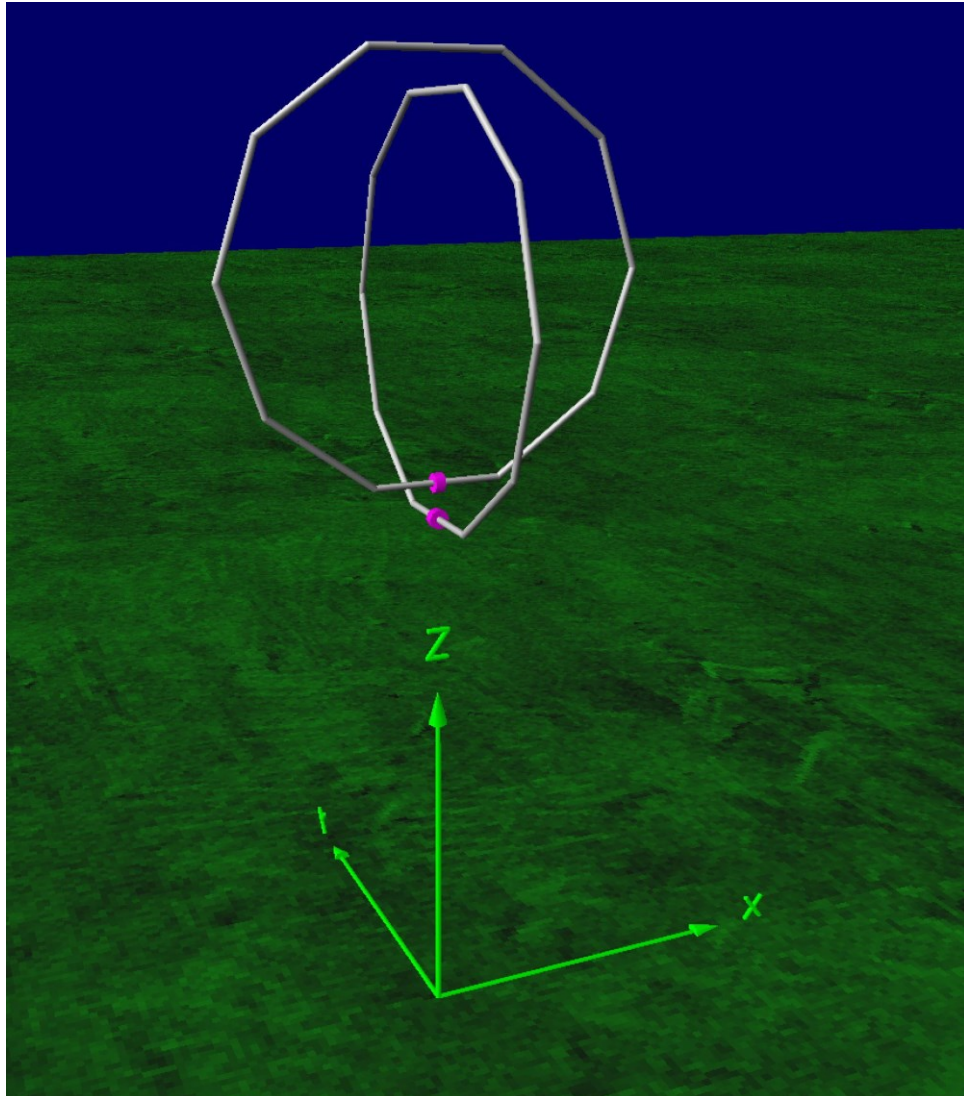


Zum Vergleichen zweier Antennen reicht eventuell das S-Meter eines Transceivers. Jedoch kann man hier meist keine exakten Pegelwerte in dBm oder dB μ V ablesen. Mit den S-Werten kann man den Pegelunterschied schätzen. Ein SDR-Empfänger wie der RSP1, der Perseus oder der ELAD FDM S2, Icom IC-R8600 u.v.a.m. liefern exakte Pegelwerte in dBm oder auch dB μ V. Allerdings ist die Empfindlichkeit eines TRX oder SDR nicht immer ausreichend. Die Rauschzahlen liegen bei TRX oft bei 10...20dB, bei SDRs sogar oft bei 25dB.

Der kleine Spektrumanalyzer „tinySA Ultra“ von PD0EK ist hier besser geeignet. Er verfügt über einen zuschaltbaren Vorverstärker mit einer Rauschzahl von $<5\text{dB}$ und man bekommt absolute Pegelwerte in dBm angezeigt. Die Messbandbreite ist einstellbar und somit bekannt um Rauschzahlen ausrechnen zu können.



<https://tinysa.org/wiki/pmwiki.php?n=Main.HomePage>



Bislang war von Antennenvergleichen die Rede. Von Nutzen wäre jedoch auch eine Absolutmessung, da ja die Simulation auch Absolutwerte liefert. Hierzu ist eine Referenzantenne mit bekanntem Antennenfaktor nötig. Diese sollte auch möglichst polarisations- und richtungsunempfindlich sein, also ein Rundstrahler für alle Polarisations Ebenen. Dieses kann eine Kreuzrahmenantenne mit 90°-Hybrid leisten, wenn man sehr kleine Einfallswinkel von $<10^\circ$ ausschließt.

Wie kann diese Kreuzloop zur Referenzantenne werden? Der Antennenfaktor muss bekannt sein!

Methode 1:

Man kann die üblichen Formeln aus der Literatur hernehmen. Über die Spannung kann man dann bei bekannter (!) Feldstärke den Antennenfaktor errechnen, wenn man auch die Verluste und die Rahmeninduktivität kennt.

$$U = \frac{2 \cdot \pi \cdot A \cdot N \cdot E}{\lambda}$$

Hier sind:

U	Spannung in V [EMK]
A	Fläche der Loop in m ²
N	Anzahl der Windungen
E	Feldstärke in V/m
f	Frequenz in MHz
λ	Wellenlänge in m
π	3.141592654...

Fred, DL2NK, hatte noch eine einfachere Idee:

Methode 2:

ohne Berücksichtigung der Größe und der Anzahl der Windungen der Loop und der Drahtstärke reichen zwei Größen zum Ermitteln des Antennenfaktors: der Strahlungswiderstand R_s und der Verlustwiderstand R_v ; diese Werte enthalten alles was zum Ermitteln des Wirkungsgrades (AVG) notwendig ist. Der ohmsche Verlust wird unter Berücksichtigung des Skineffektes ermittelt, entweder durch Berechnung „zu Fuß“ oder durch Simulation mit NEC. Der Strahlungswiderstand wird entweder mit NEC ermittelt, oder auch wieder mit Formeln aus der Literatur. R_s kann man mit folgender Formel berechnen:

$$R_s = 120 * \pi * \frac{8}{3} * \pi^3 * \left(\frac{A}{\lambda^2}\right)^2$$

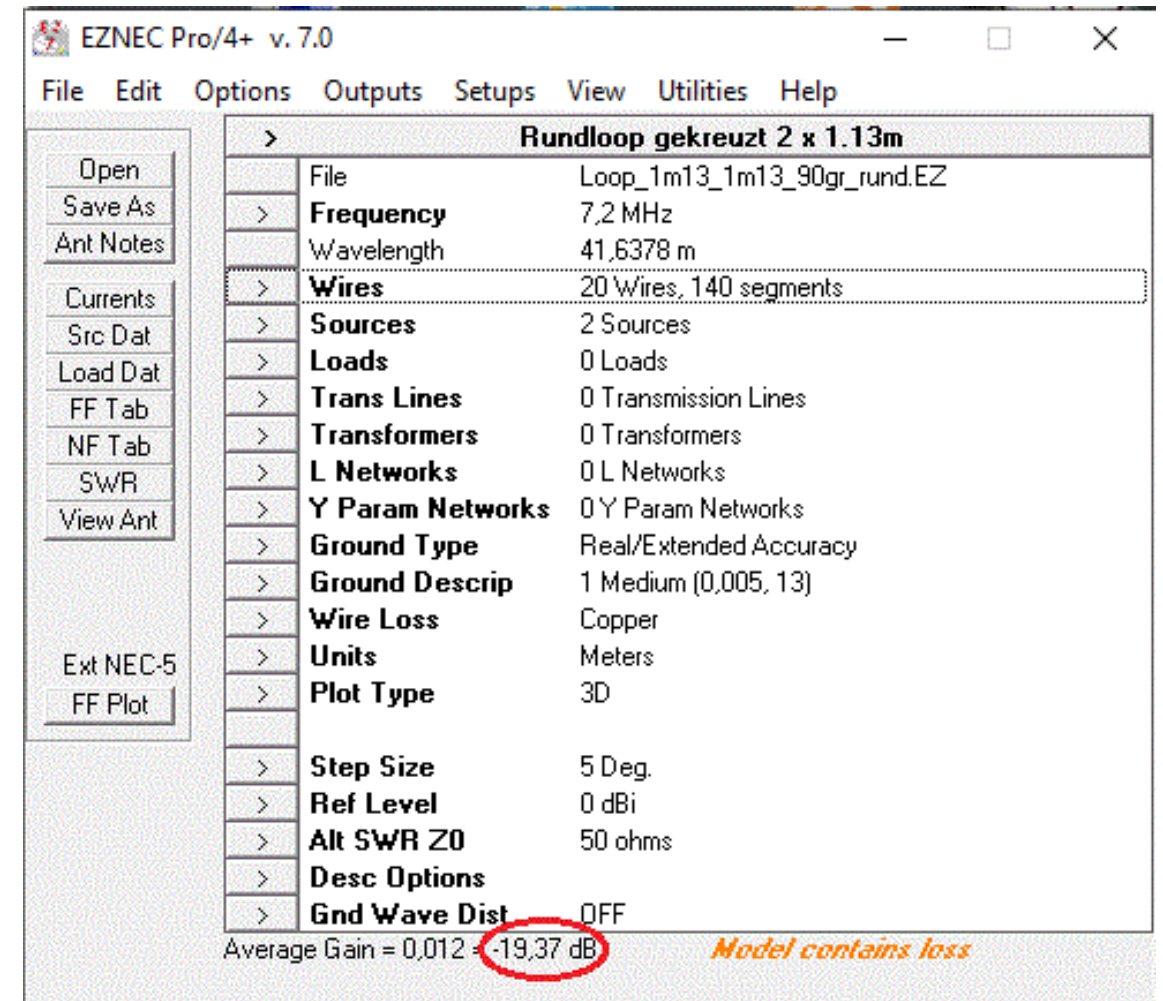
Die Berechnung des AVG erfolgt dann nach dieser Formel:

$$AVG = 10 * \log_{10}\left(\frac{R_s}{R_s + R_v}\right)$$

Durch zahlreiche Rechnungen „zu Fuß“ mit Skineffekt und durch Simulationen mit NEC haben wir eine sehr gute Übereinstimmung dieser Methoden festgestellt. Die Bestimmung des AVG der Referenzantenne auf diese Weise ersetzt zwar keine Kalibrierung in einem zertifizierten Labor, ist jedoch mit Amateurmitteln ein sehr guter Kompromiss mit ausreichend genauen Ergebnissen.

Methode 3:

Der mit Abstand einfachste Weg zur Ermittlung des AVG ist jedoch eine Simulation mit NEC ohne selbst zu rechnen. EZNEC 7 liefert direkt den gewünschten Wert. Vergleiche mit einem in $\lambda/4$ Höhe aufgehängten horizontalen Dipol, welcher sich sehr genau simulieren lässt, ergaben immer gute Übereinstimmung.



The screenshot shows the EZNEC Pro/4+ v. 7.0 software interface. The main window displays the following parameters for a simulation titled "Rundloop gekreuzt 2 x 1.13m":

Parameter	Value
File	Loop_1m13_1m13_90gr_rund.EZ
Frequency	7,2 MHz
Wavelength	41,6378 m
Wires	20 Wires, 140 segments
Sources	2 Sources
Loads	0 Loads
Trans Lines	0 Transmission Lines
Transformers	0 Transformers
L Networks	0 L Networks
Y Param Networks	0 Y Param Networks
Ground Type	Real/Extended Accuracy
Ground Descrip	1 Medium (0,005, 13)
Wire Loss	Copper
Units	Meters
Plot Type	3D
Step Size	5 Deg.
Ref Level	0 dBi
Alt SWR Z0	50 ohms
Desc Options	
Gnd Wave Dist	OFF

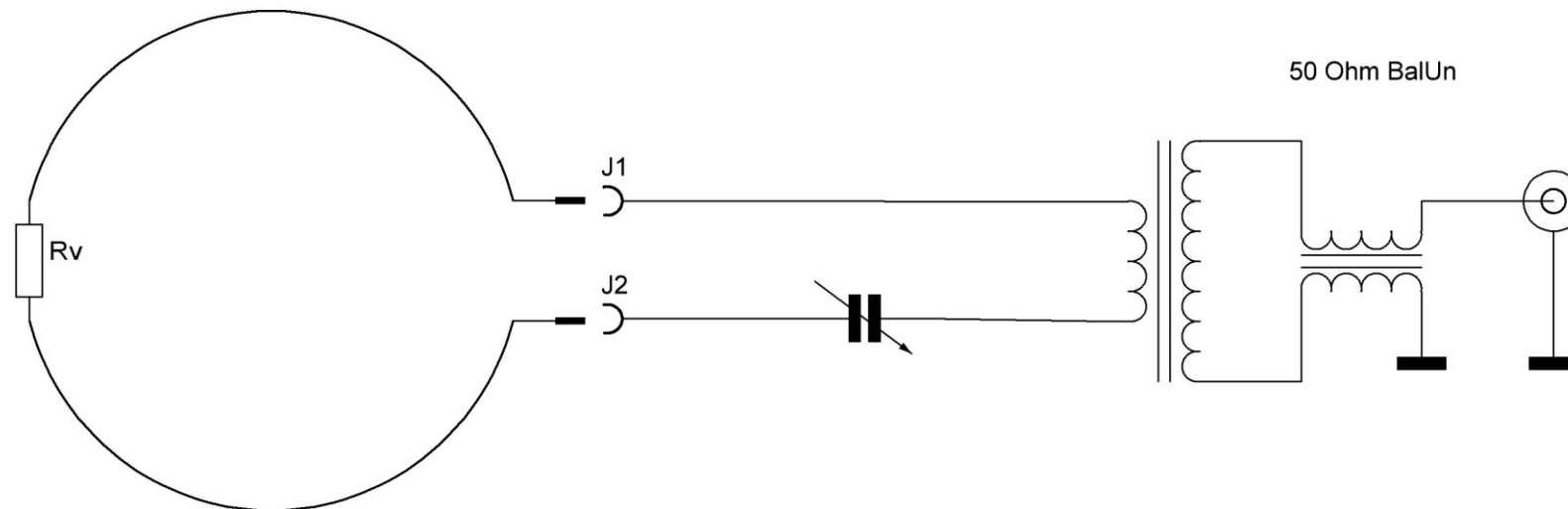
At the bottom of the window, the Average Gain is displayed as 0,012 **-19,37 dB** (circled in red). A warning message "Model contains loss" is visible in the bottom right corner.

Die Simulation der AVG-Werte mit NEC erwies sich als sehr zuverlässig. DL2NK und ich hatten mit sehr unterschiedlichen Loops, 80cm/2 Wdg. und 1,13m/1Wdg auf $\pm 0,4\text{dB}$ gleiche Ergebnisse bei einer Rauschmessung an einem ruhigen Ort.

Praktischer Aufbau:

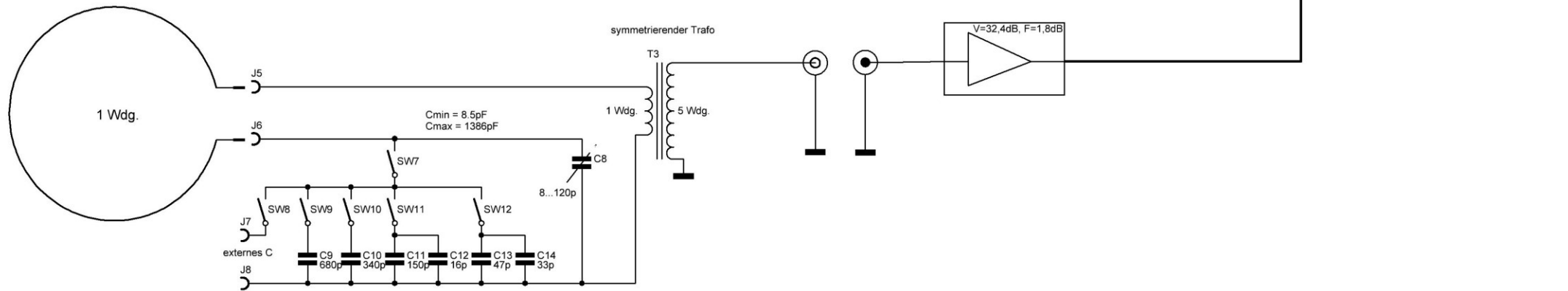
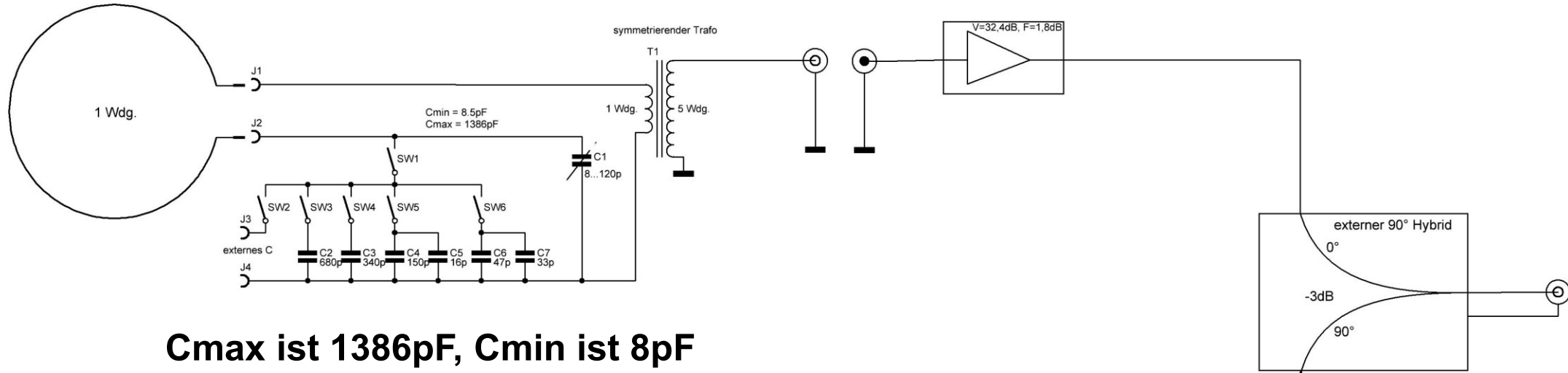
Frühere Versuche und Messungen mit Rahmenantennen haben ergeben, dass weder der hochohmige offene Betrieb mit oder ohne Resonanzabstimmung (starkes Verstärkerrauschen) noch der Kurzschlussbetrieb ohne Abstimmung (Strombegrenzung durch den unkompensierten Blindwiderstand) auch nur annähernd ausreichende Empfindlichkeit bieten, um das schwache „Weltraumrauschen“ aufnehmen zu können. Für „normalen“ Empfang sind sie gut geeignet. Siehe hierzu Literaturhinweise unten. Es muss der Kurzschlussbetrieb mit Serienresonanz angewendet werden, da nur dieser die maximale Empfindlichkeit gewährleistet!

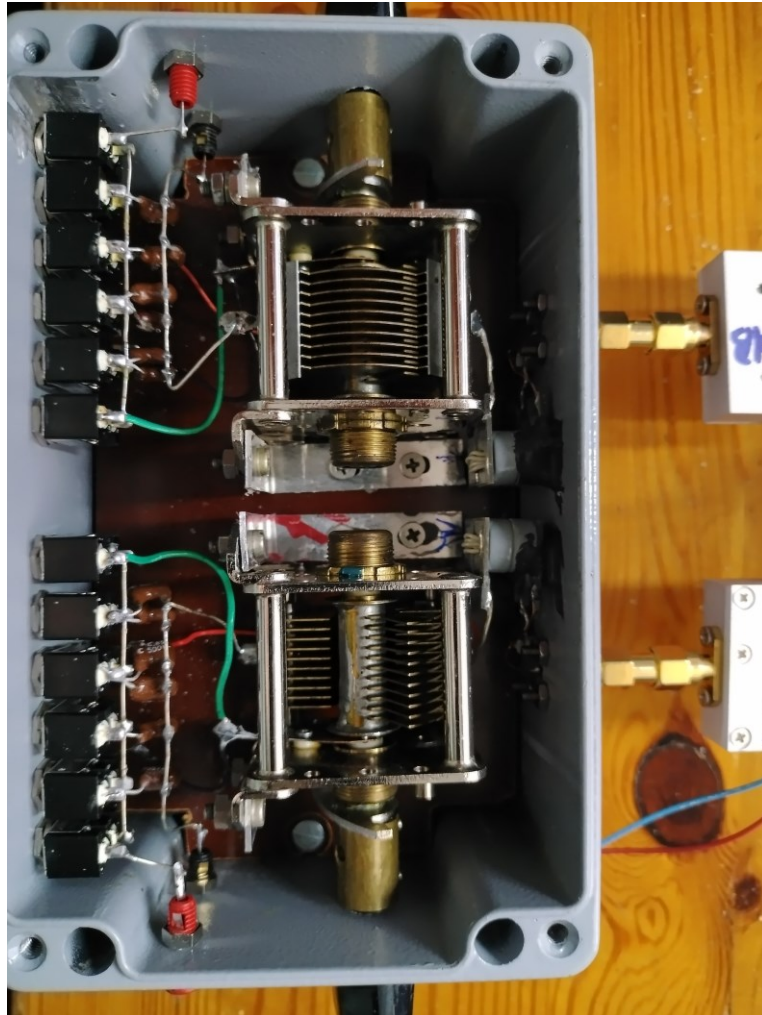
Die Loop muss also in Serienresonanz betrieben werden. Verwendet man relativ dünnen Draht ($0.5\text{mm}^2 \dots 1\text{mm}^2$) bestimmt dieser den R_v . Eine 1m^2 -Loop mit $D=1,13\text{m}$ aus $0,8\text{mm}^2$ hat $3,55\text{m}$ Umfang, eine Induktivität von $5,4\mu\text{H}$, bei 7MHz $R_s \sim 10\text{m}\Omega$ und $R_v \sim 1,5\Omega$, obere Grenzfrequenz = $12,7\text{MHz}$. Zu den Skin-Verlusten kommen in der Praxis noch weitere Verluste, wie z.B. die Trafo-Verluste und Erdverluste, sodass man z.B. mit 2Ω und einem 1:5 Trafo eine gute Anpassung bekommt.



Hiermit ergibt sich eine einfache Messmethode zur korrekten transformation: man misst das VSWR mit einem Trafo, z.B. 1:5, und variiert das Übersetzungsverhältnis gegebenenfalls solange, bis die Anpassung gut ist. Nun hat man alle Verluste erfasst! Bei 1:5 sind 2Ω Verlustwiderstand das Optimum. Man kann auch zusätzlich einen kleinen Widerstand einbauen, z.B. 1Ω .

Die Anpassung der Antenne beruht, ganz anders als bei einer Sendeloop, nur auf Anpassung an die Verluste, da der Strahlungswiderstand sehr klein ist! Der Vorteil: über einen großen Frequenzbereich gute Anpassung, was für die Messgenauigkeit wichtig ist. Trotz dieser „Verlustanpassung“ ist die Empfindlichkeit noch völlig ausreichend. Die Abstimmung erfolgt z.B. mit einer binären C-Bank und Drehko zur Feinabstimmung.

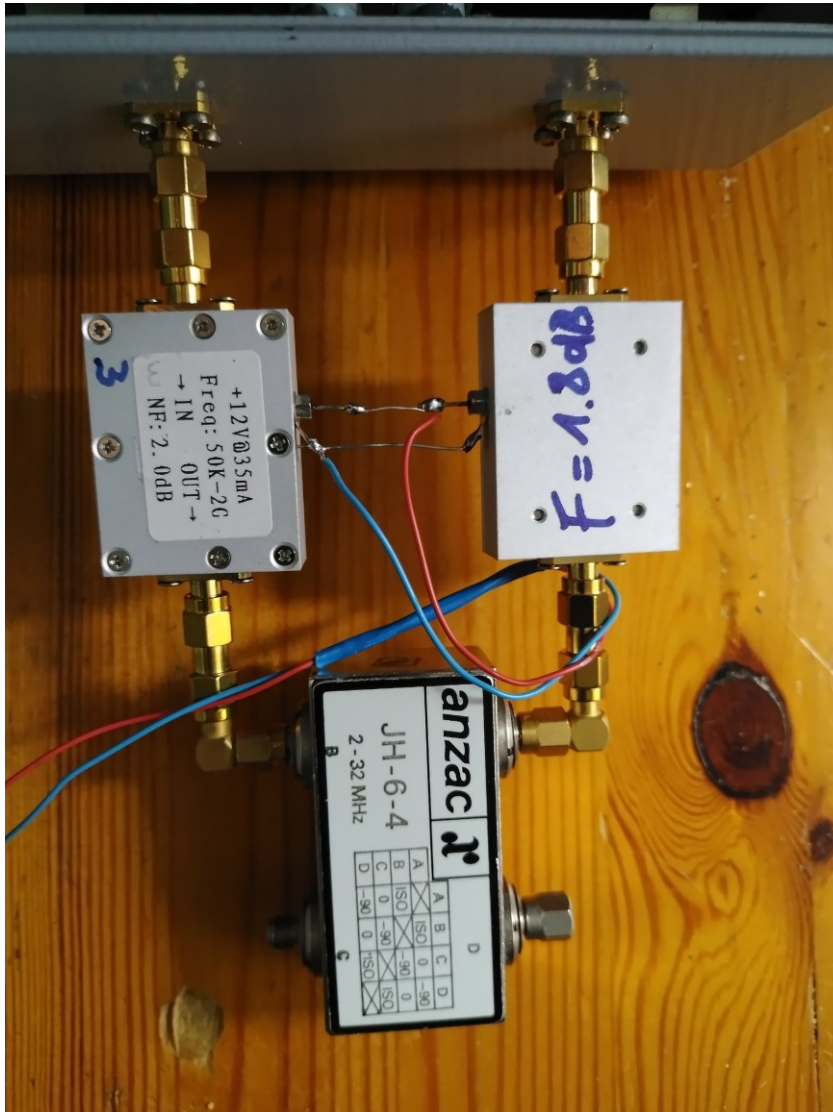




Binäre C-Bank mit Kippschaltern und „Fein-Drehkos“, 2mm Bananenbuchsen zum Anschluss der Loops

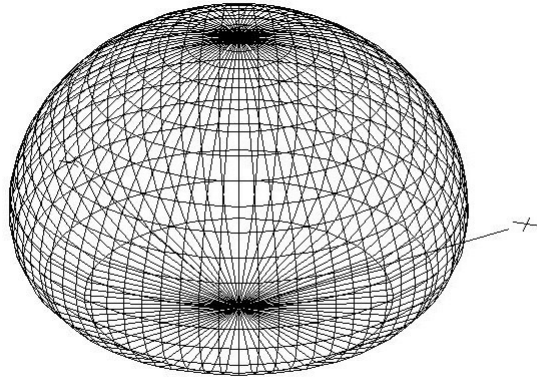




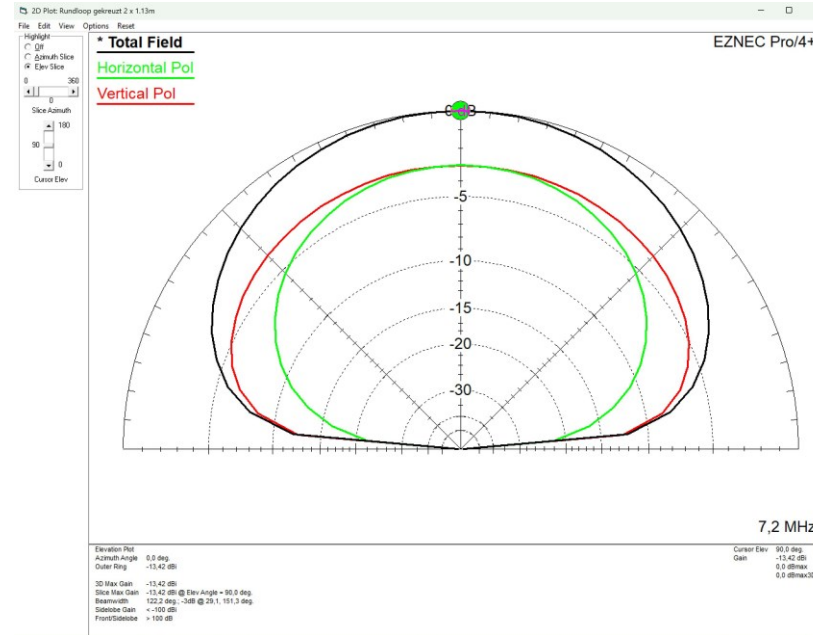


Die Verstärker: im China-Angebot bei Ebay findet man brauchbare Verstärker im Gehäuse. Da die Loopempfindlichkeit und die Feldstärke des „Weltraumrauschens“ sehr gering sind, benötigt man, je nach Empfängerempfindlichkeit, eventuell eine Verstärkung von z.B. ca. 30dB bei einer gleichzeitig guten Rauschzahl von $\leq 2,5\text{dB}$. Durch vermessen mehrerer Exemplare fand ich 2 gleiche Exemplare mit $V=32,4\text{dB}$ und $F=1,8\text{dB}$.

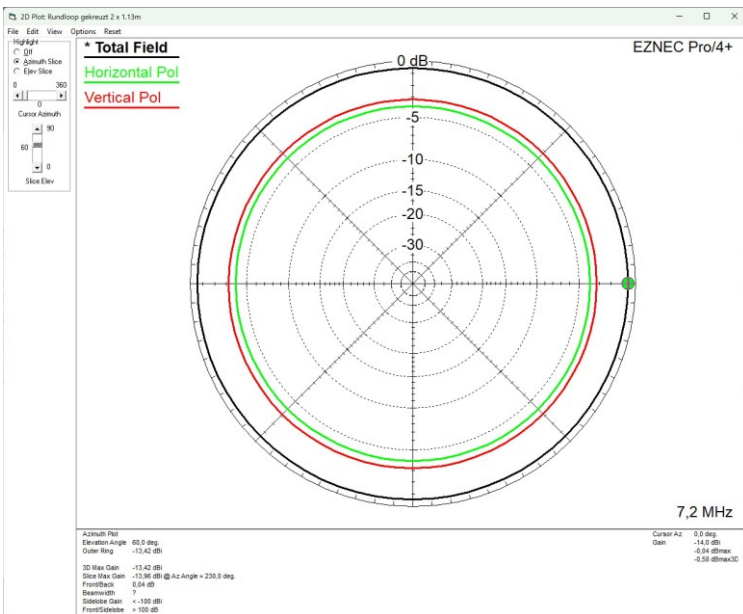
EZNEC Pro/4+



7,2 MHz



Diese Simulation gelingt nur mit NEC5!

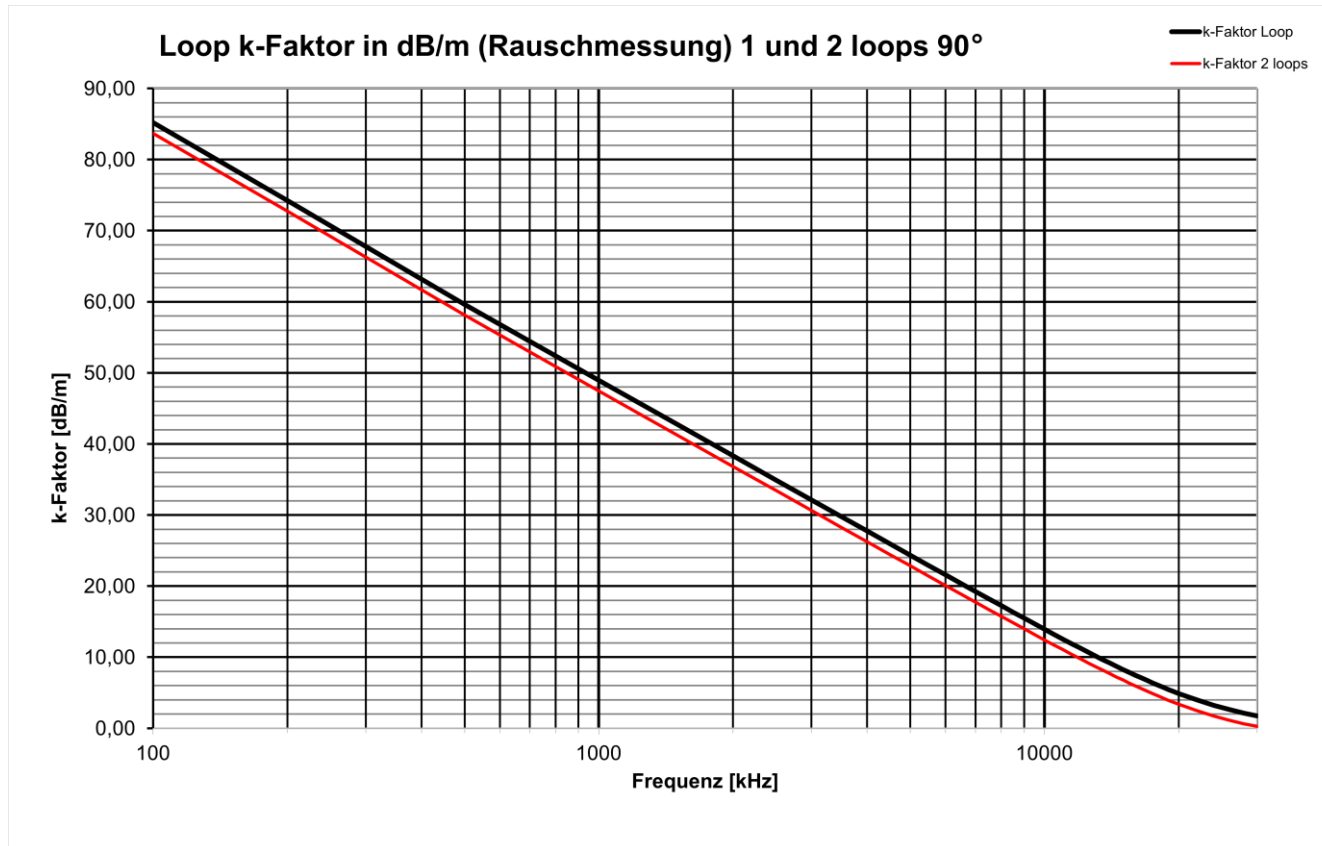


**Diagramme der Kreuzloop:
Bei flachen Winkeln ist Hpol etwas kleiner als Vpol, ab 45° Elevation (Himmel) vernachlässigbar. Bei 60° El perfektes Kreisdiagramm. Geeignet auch für Steilstrahlung!**

Bei Verwendung des tinySA Ultra (siehe oben) benötigt man meistens keinen Vorverstärker. Man muss auch bedenken, dass ein Verstärker die Messgenauigkeit verschlechtert, wenn der Frequenzgang nicht linear und die Verstärkung nicht exakt bekannt sind. Beide Antennen, mit oder ohne Verstärker, werden über einen 90°-Hybridkoppler zusammengefasst. Augen auf in Flohmärkten, diese Teile sind sehr selten und neu unbezahlbar! Wer kann, baut sich so etwas selber (3dB-Splitter bzw. Wilkinsonteiler (kein resistiver Teiler!) + Differenzphasenschieber).

Geht das auch einfacher?

Ja, wenn man auf das perfekte Runddiagramm verzichtet und nur eine Loop ohne 90°-Hybrid verwendet. Hier muss man sich vor der Messung durch Drehen der Loop davon überzeugen, dass das Rauschen aus allen Azimuthwinkeln gleich stark ist. Die Messgenauigkeit ist dann etwas reduziert.



Das Resultat aus diesen Bemühungen ist das nebenstehende Diagramm. Es zeigt den Antennenfaktor über der Frequenz für eine 1,13m-(Kreuz)loop. Die schwarze Kurve: einfache Loop und die rote: Kreuzloop mit 90°-Hybrid, sie liegt 1,5dB unter der schwarzen, ist also um 1,5dB empfindlicher.

Der Knick der Kurven bei etwa 12...14MHz zeigt die obere Grenzfrequenz der Antenne an. Für höhere Frequenzen muss die Antenne verkleinert werden!
Wichtig: Umfang $\leq 0,15\lambda$! Bei $D=1,13m$: $U=3,55m$, $F_{max}=12,7MHz$

Die Messung:

- Man stimmt die Loop auf der gewünschten Frequenz auf Rauschmaximum ab und testet durch Trennen der Antenne vom RX und erneutes Verbinden, ob ein deutlicher Rauschunterschied festzustellen ist. Wenn nein, Verstärker verwenden.
- Dann misst man den Rauschpegel (dBm)
(Wenn möglich ohne Verstärker), z.B. -123dBm bei $B=3\text{kHz}$ ($B_f = 34,8\text{dB}$)
- Korrektur des Wertes mit AVG der Antenne, z.B. 20dB bei 7MHz aus der Kurve: ergibt $-123\text{dBm} + 20\text{dB} = -103\text{dBm}$
- Dies entspricht nun der Referenz $\text{AVG} = 0\text{dB}$
- Rauschpegel der D.U.T. Antenne messen, z.B. -110dBm
- Differenz = AVG des D.U.T. : $\text{AVG} = -110 - (-103) = -7\text{dB}$

Die getestete Antenne weist also einen AVG von -7dB auf. Benötigt man einen Verstärker, muss dieser bei beiden Antennen verwendet werden, dann „kürzt“ sich auch ein evtl. Frequenzgang heraus.

Man kann nun entscheiden, ob ein einfacher Vergleich zweier Antennen ausreicht, oder ob man einen Absolutwert mit Amateur-Genauigkeit braucht. Beides ist mit Messen des Weltraumrauschens möglich.

Literatur und Links

FA 1/15 Magnetschleifenantennen zum Empfang von Lang- bis Kurzwelle, J.Logemann

FA 4/23 Aktive Magnetantennen für Störungssuche und KW-Empfang, J.Logemann

Jörg Logemann, aktive Empfangsantennen, Epubli Verlag, Thalia, Amazon usw.

<https://www.qrz.com/db/DL2NK>

<https://tinysa.org/wiki/pmwiki.php?n=Main.HomePage>

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!
Noch Fragen?

