

Simulation und Realisierung einer Helixantenne für 2,45 GHz mit 4NEC2

von Gunthard Kraus, DG8GB

1. Simulation von Drahtantennen mit NEC

NEC (= Numerical Electric Code) ist eine vom Lawrence Livermore Labor im Jahre 1981 für die Navy entwickelte Simulationsmethode für Drahtantennen. Dabei wird die Antenne in sehr kurze Stücke = „segments“ zerlegt, auf denen sich der Strom und die Spannung (fast) nur linear ändern. Damit lassen sich erstaunlich genaue Simulationen durchführen. Der Standard -- für den es sehr viele, auch kostenlose, Anwendungssoftware gibt -- ist hierbei **NEC2**. Die Entwicklung ist natürlich weitergegangen und die Schwächen von NEC2 (z. B. falsche Berechnung von Strukturen mit sich sehr nahe kreuzenden oder im Boden verbuddelten Drähten) wurden erst mit NEC4 ausgebügelt, aber:

NEC4 war lange für den Export gesperrt und galt als geheim. Heute ist es auch außerhalb der USA erhältlich, aber recht teuer (normalerweise ca. 2000\$).

NEC2 könnte man sich aus dem Internet herunterladen, aber damit lässt sich noch nichts anfangen. Es handelt sich dabei um die reine „Rechenmaschine“, die ursprünglich in Fortran geschrieben wurde und auch als kompiliertes Maschinenprogramm zur Verfügung steht. Folglich haben viele Leute dazu umfangreiche Bedieneroberflächen entworfen und diese als Windows-Programme vermarktet -- teils kostenlos, teils gegen erträgliche Preise. Hier sticht nun „**4NEC2**“ mit großem Abstand heraus, denn es wurde mit soviel Zusatzprogrammen und Möglichkeiten ausgestattet, dass man nur staunen kann. Und es ist kostenlos. Deshalb Lob und Dank an den Autor Arie Voors!

2. Die Helix-Antenne

2.1. Einige Worte zuvor

Sie ist eine recht interessante Konstruktion mit ebenso interessanten Eigenschaften. Es handelt sich um eine Drahtspirale mit einem **Windungsumfang von einer Wellenlänge** der Betriebsfrequenz und mindestens 3 Windungen. Mehr Windungen erhöhen den Gewinn und verkleinern den Öffnungswinkel. Die typische **Steigung beträgt etwa ¼ der Wellenlänge** und der am Anfang der Spirale angeordnete Reflektor soll ebenfalls einen Durchmesser von 1 Wellenlänge haben.

Und das macht die Antenne so interessant:

- a) Sie liefert eine zirkular polarisierte Abstrahlung, wobei der Wickelsinn der Spirale die Polarisation festlegt.
- b) Sie weist bei ihren Daten und Eigenschaften eine erstaunliche Konstanz innerhalb einer Bandbreite von ca. 20% der Wellenlänge auf.
- c) Der Strahlungswiderstand beträgt theoretisch 150Ω (praktisch sind es Werte zwischen $150\dots 200\Omega$) und er ändert sich nur behutsam.
- d) Blindanteile sind vorhanden, sind frequenzabhängig und müssen bei der Anpassungsauslegung beachtet werden. Aber sie sind deutlich kleiner als der Strahlungswiderstand und überschreiten selten einen Wert von 50Ω .
- e) Wegen des Metall-Reflektors haben wir nahezu keine Abstrahlung in Rückwärtsrichtung und deshalb immer ein hervorragendes Vor-Rück-Verhältnis.
- f) Insgesamt ist diese Antenne äußerst gutmütig und verzeiht viele Großzügigkeiten bei der mechanischen Umsetzung des Entwurfs.

Da es meist keine Rose ohne Dornen gibt, seien hier die Kehrseiten erwähnt:

- a) Die mechanischen Abmessungen sind leider nicht so zierlich wie bei manchen anderen Antennenformen.
- b) Das Richtdiagramm sieht im Vergleich zu anderen Antennen mit ähnlichem Gewinn bisweilen leicht „verbeult“ aus.
- c) Die erstaunliche Breitbandigkeit bezahlt man mit einem etwas verminderten Antennengewinn, der eben nicht als „Spitzenklasse“, sondern eher „zwischen Mittelfeld und Spitze“ einzustufen ist.

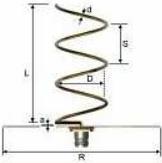
2.2. Vorgaben für eine 2,45GHz-Helix-Antenne (WLAN)

Dazu kann man die Original-Unterlagen des Erfinders John D. Kraus [1] verwenden, aber viel leichter geht es mit den Online-Calculatoren im Internet, die diese Entwurfsrichtlinien verwenden.

Der Anwender braucht lediglich die vorgesehene **Betriebsfrequenz** (hier: 2,45GHz) und die **Zahl der Windungen** einzugeben (= mit steigender Windungszahl gibt es mehr Gewinn und eine schmalere Keule, aber eben auch ein längeres Gebilde..). Deshalb wurden zur Einarbeitung einfach mal mit **6 Windungen** gearbeitet und damit ein passender Calculator gefüttert:

Design frequency	2450	MHz
Number of turns	6	
Turn spacing	0.25	wavelengths
<input type="button" value="Calculate"/>		

The results



Legend: The letters in the image are used in the table below.
To get a large version, click on the image.

Wavelength		122.4	mm
Ideal diameter (internal)	D=	41.6	mm
Gain		10.85	dBi
Conductor diameter	d=	2.4	mm
Winding step (between centers)	S=	30.6	mm
Separation of the adapter section	a=	1.1	mm
Total conductor length		806.5	mm
Minimum reflector diameter	R=	75.9	mm
Total antenna length	L=	183.6	mm

Ergebnis:

Wellenlänge = 122,4mm
für eine Mittenfrequenz von 2,45GHz

Innerer Durchmesser
= 41,6mm

Gewinn = 10,85dBi

Drahtdurchmesser = 2,4mm

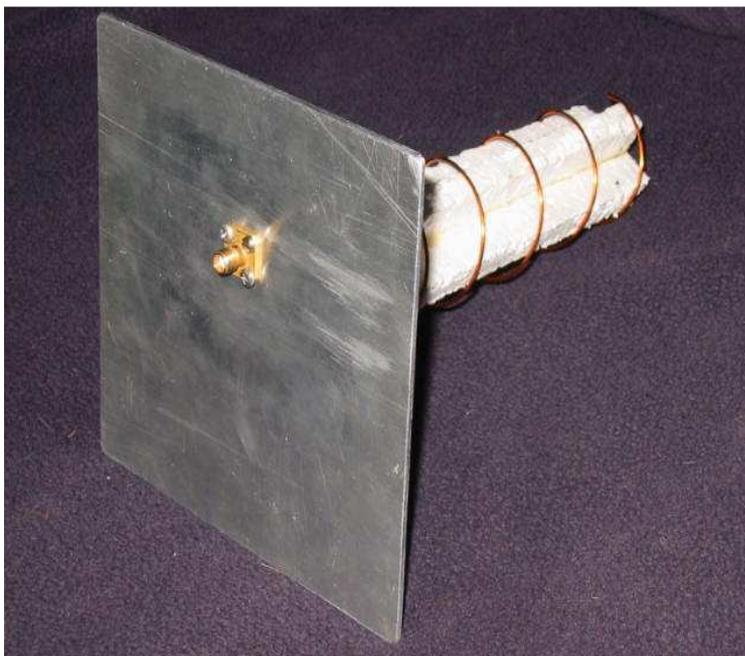
Steigung = 30,6mm

**Minimaler Reflektor-
durchmesser** = 75,9mm

Gesamte Antennenlänge =
183,6 mm = **6 x 30,6 mm**

(In der Ergebnisliste findet man noch die gesamte Drahtlänge sowie die Information, dass die Struktur um 1,1mm angehoben wurde, um Platz für die Einspeisung zu schaffen).

Für die praktische Ausführung wurde jedoch ein **Kupferdraht mit einem Durchmesser von 1,25 mm** gewählt, denn damit lässt sich die Verbindung von Spiralanfang und Innenleiter des vorgesehenen SMA-Steckers leichter und ohne große Durchmessersprünge herstellen. NEC möchte jedoch außer diesem Drahtdurchmesser den **mittleren Durchmesser** der Spirale wissen -- der liegt dann bei 41,6mm + 2,4mm = **44 mm**.



Als **Reflektor** dient eine quadratische Aluminiumplatte mit einer Dicke von 2 mm und einer Kantenlänge von 130 mm (= mehr als 1 Wellenlänge, wie verlangt). An der Unterseite dieser Platte ist eine SMA-Buchse angeschraubt, deren Innenleiter durch die Reflektorplatte hindurchreicht und an den der Spiralanfang gelötet wird. Für die Simulation ist nun noch wichtig, dass darin die **Helix um 5mm angehoben** wird, um diese Lötverbindung nachzubilden.

Die Helix selbst wird durch eine selbst gefertigte und mit „UHU por“ auf das Reflektorblech geklebte Stütze aus 2 Styroporstreifen mit je 10 mm Dicke an ihrem Platz gehalten.

(...Styropor enthält neben 80% Luft den auch bei so hohen Frequenzen noch gut brauchbaren Isolierwerkstoff Polystyrol = Styroflex). Im nebenstehenden Bild sind diese Details gut zu sehen.

3. Drahtantennen-Simulation mit 4NEC2

3.1. Start und erste Simulation

Die Software kann in gezippter Form aus dem Internet herunter geladen werden. Dann sind das Grundprogramm „4NEC2“ und das Zusatzprogramm „4NEC2X“ zu installieren. **Aufgerufen wird jedoch stets 4NEC2X, denn nur damit sind farbige 3D-Darstellungen der Simulationsergebnisse sowie der Antennenstruktur möglich.**

3.2. Die Erstellung des NEC-Files und die erste Simulation

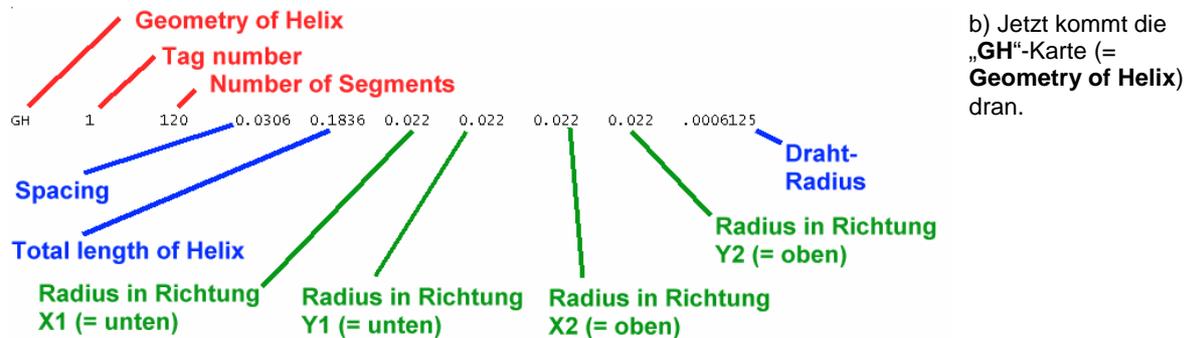
Dazu reicht ein einfacher Texteditor (wie z. B. Notepad) und alle nötigen Anweisungen (Fachausdruck: „Cards“) werden von Hand eingetippt. Zu beachten ist, dass NEC alle eingegebenen Abmessungen in „Metern“ misst. Soll das nicht so sein (z. B., wenn mit „inch“ gearbeitet wird), dann muss eine zusätzliche „Skalierungskarte“ für die passende Umrechnung sorgen. So sieht das dann für unsere Helix aus:

```

CM Helix 2450MHz (6 turns) over perfect ground
CM Helix starts 5mm above ground
CM Helix diameter = 44mm, spacing = 30.6mm
CM Wire with a diameter of 1.25mm added between helix and ground
CM Excitation at center of this wire
CE
GH1 120 0.0306 0.1836 0.022 0.022 0.022 0.022 .0006125
GM 0 0 0 0 0 0 0 0 0.005 0
GW 150 1 .022 0 0 0 0.022 0 0.005 0.0006125
GE1
GN1
EK
EX 0 150 1 0 1. 0
FR 0 0 0 0 2450. 0
    
```

Erklärung:

a) „CM“ sind **Kommentarkarten** und werden vom Programm ignoriert. „CE“ bedeutet „**Ende der Kommentare**“.



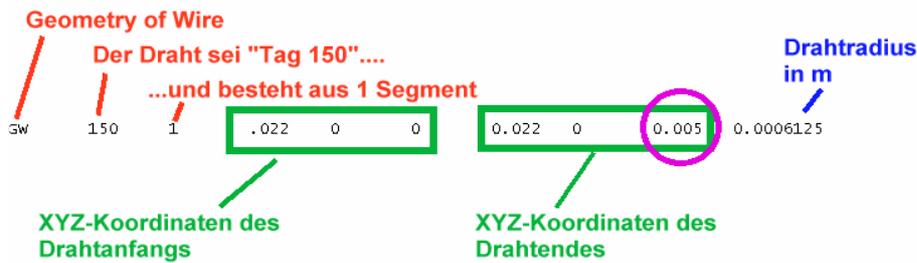
c) Nun schieben wir die Helix mit der „GM-card“ (= **Geometry move card**) um 5mm nach oben:

```

GM 0 0 0 0 0 0 0 0 0.005 0
    
```

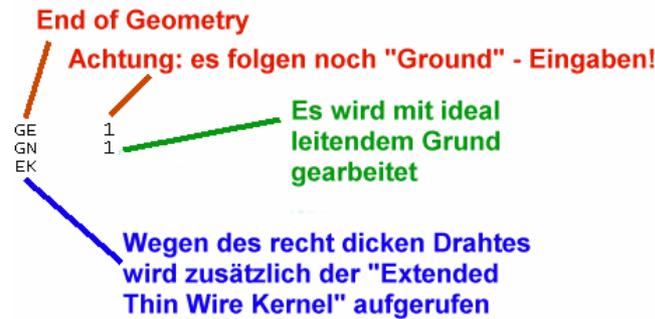
Verschiebung um 5mm = 0,005m nach oben

d) Dann geht es an den Verbindungsdraht, der den Innenleiter der SMA-Buchse darstellen soll und gleichzeitig zur Anregung der Antennenstruktur dient. Sein oberes Ende wird mit dem Helix-Anfang verbunden (= gleiche Koordinaten von Helixanfang und oberem Ende des Drahtstückes eingeben!). Das untere Drahtende wird auf die „Ground-Ebene“ gelegt, die vom Reflektor gebildet wird. Der Speisepunkt wird von NEC automatisch immer in die Mitte eines Segmentes gelegt, das natürlich später noch anzugeben ist.

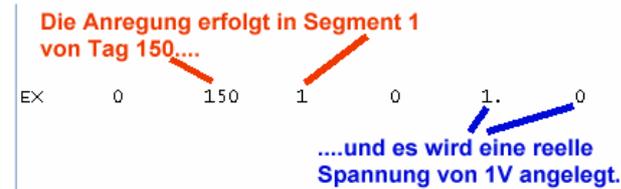


(GW = Geometry of Wire)

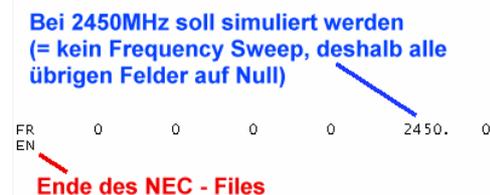
Sehr schön sieht man, dass sich das obere Ende des speisenden Drahtstückes in 5mm Höhe mit dem Helixanfang treffen muss.



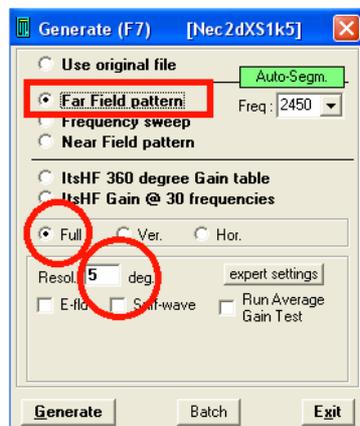
e) Die nächsten drei Karten (GE / GN / EK) erledigen wir auf einmal: da geht es nämlich nicht nur um das **Ende der Geometrie-Angaben**, sondern auch um den „Ground“ und die Tatsache, dass der **Antennendraht nicht unendlich dünn ist**.



f) So wird die Speisung (**Excitation**) der Struktur programmiert.



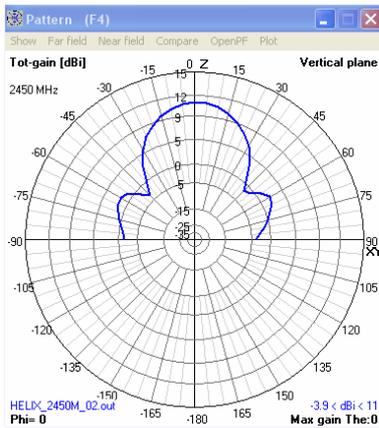
g)Und das ist der Rest, nämlich die **Frequenzangabe** sowie die Markierung des **NEC-File-Endes**.



Das NEC-File wird nun irgendwo in einem passenden und selbst erstellten Verzeichnis mit der Endung „*.nec“ abgelegt, z. B. als „helix_2450MHz.nec“.

Dann wird 4NEC2X gestartet und anschließend über „Main / File / open 4nec2 in-/output file“ und den passend Pfad dieses Antennenfile geladen.

Die letzte Tat ist ein Druck auf die **Taste F7**, denn damit kommt man an die Simulation heran. Und nachdem man die nebenstehenden Einstellungen (**Far Field pattern / Full / Resolution = 5 degrees**) vorgenommen hat, kann man „**Generate**“ drücken und auf das Ergebnis warten.



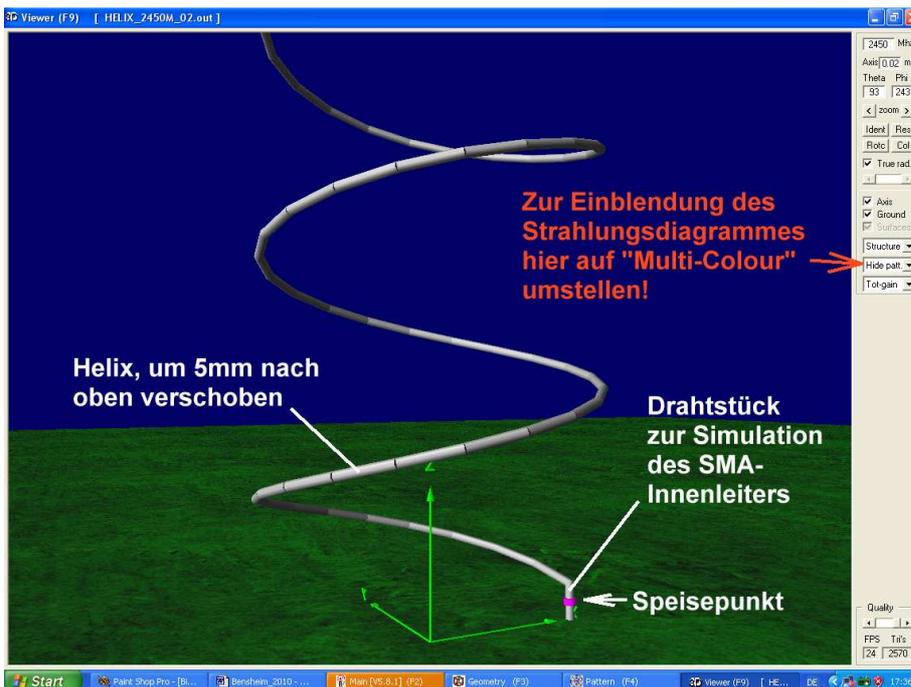
So sieht das simulierte Fernfeld-Strahlungsdiagramm (far field pattern) bei der Frequenz 2450 MHz aus.

Links unten findet man den zugehörigen **Azimuthwinkel „Phi“** = Null Grad (= horizontaler Drehwinkel).

Der **Elevationswinkel „Theta“** ist wie üblich von 0....180 Grad bzw. von 0...-180 Grad am Diagrammumfang eingetragen.

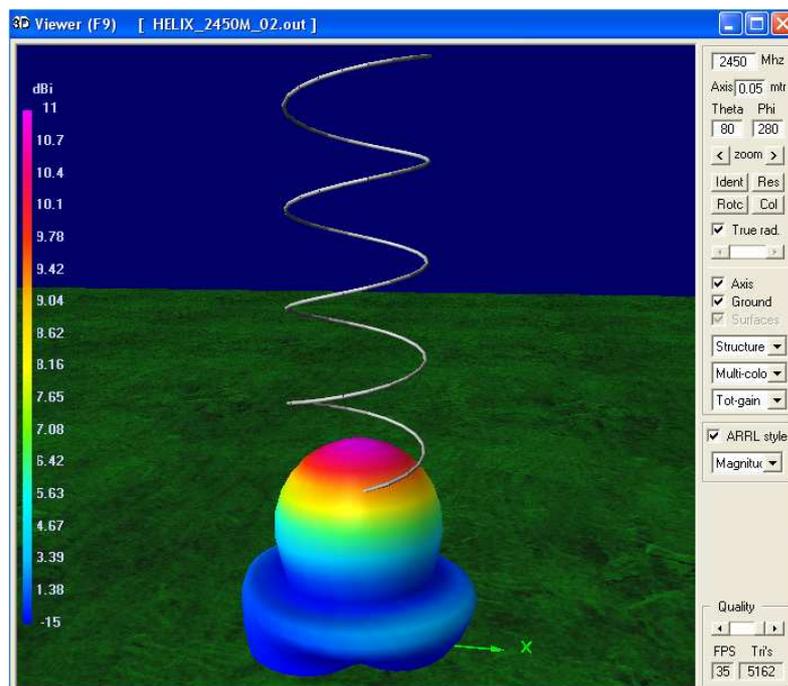
So, und jetzt wollen wir mal die bereits erwähnte **3D-Darstellung** aufrufen.

Dazu drücken wir die **Taste F9**.



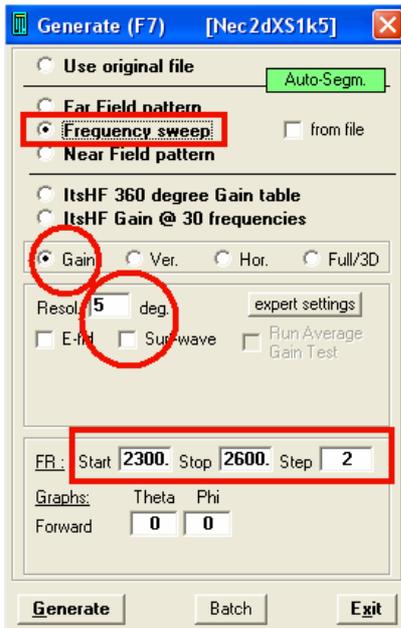
Zuerst sehen wir die Antennenstruktur (hier: bereits leicht gezoomt) und können die Details identifizieren. Sehr schön ist nun der in violetter Farbe vom Programm markierte Speisepunkt in der Mitte des senkrechten Drahtstückes zu erkennen.

Die Struktur lässt sich nun in bekannter Weise bei gedrückter Maustaste drehen und wenden.



Sobald wir beim gekennzeichneten Menü auf „**Multi-Colour**“ umstellen, wird zusätzlich das **räumliche Strahlungsdiagramm sowie die Farbzuordnung für die Gewinnskala in dBi** eingeblendet.

3.2. Simulation von Gain, SWR und Impedanz



Da ist zuerst wieder ein Druck auf die Taste F7 nötig, um an das Simulationsmenü heranzukommen. Darin wird nacheinander eingestellt:

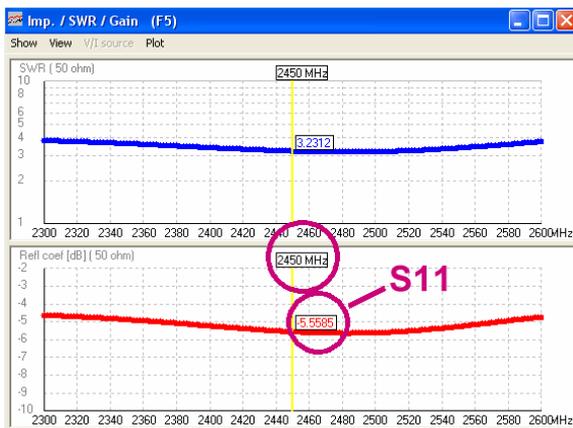
Frequency sweep

Gain (...die auftauchende Meldung „no front / back ratio data is generated“ wird einfach weggeklickt)

Resolution = 5 degrees

Start = 2300MHz, Stopp = 2600MHz, Step = 2MHz
 (...es sind maximal 150 Schritte möglich, deshalb darf man die Schrittweite nicht zu groß wählen...)

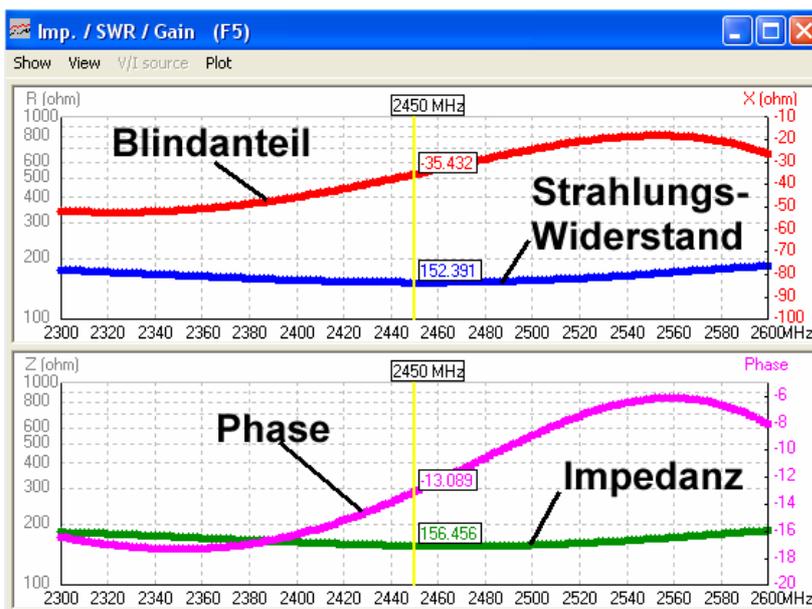
Mit „**Generate**“ wird dann wieder die NEC-Rechenmaschine als Maschinenprogramm gestartet.



Dieser Bildschirm mit dem SWR und dem Reflektionskoeffizienten empfängt uns als erstes nach der erfolgreichen Simulation.

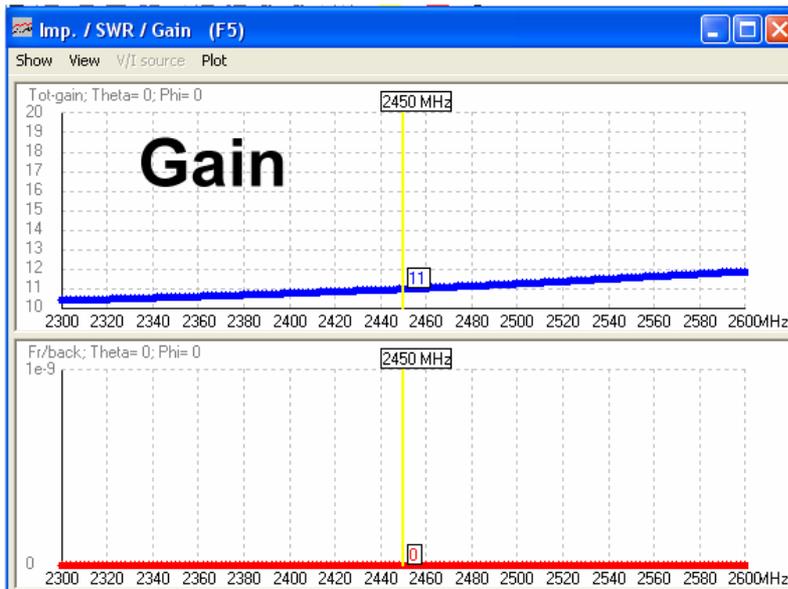
SWR (= 3,2) und **S11 (= -5,85 dB)** sind bei 2450 MHz relativ schlecht, aber das muss kein schlimmes Zeichen sein: nach der Theorie liegt nämlich der Strahlungswiderstand zwischen 150 und 200Ω und dann erhält man eben solche Werte.

Sehen wir uns deshalb mal die Eingangsimpedanz an -- hinter der Taste „Show“ im linken oberen Eck des Menüs kann man sie aufrufen.



Die Theorie wird sehr schön bestätigt, denn der **Strahlungswiderstand** bewegt sich im gesamten Frequenzbereich (zwischen 2300 und 2600MHz) zwischen den behaupteten **150 und 190Ω**.

Und nur im unteren Bandbereich steigt der **Blindanteil bis auf -j50Ω**.

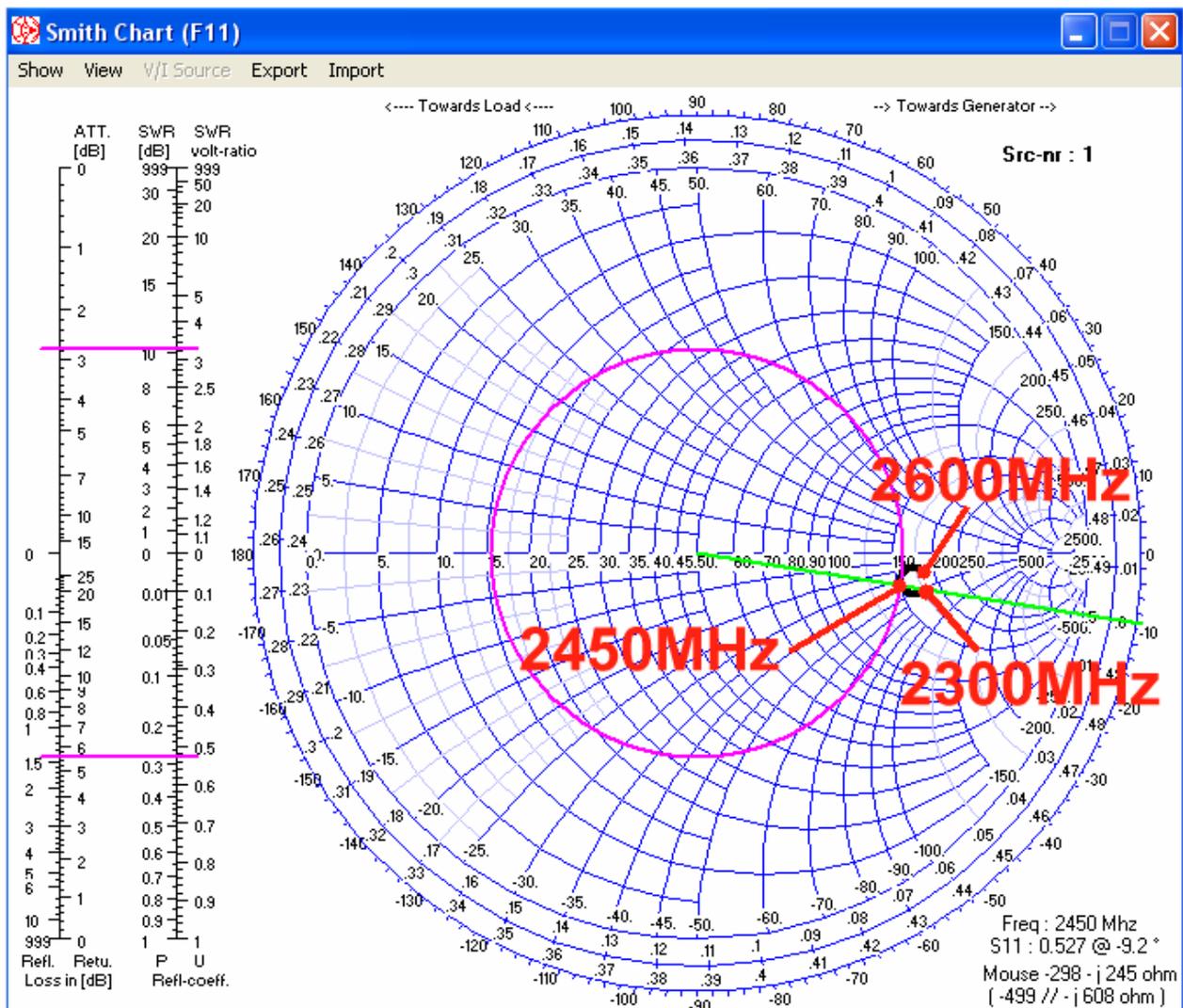


Dann bleibt nur noch der Blick auf den Verlauf des Antennengewinns (...der Aufruf findet sich wieder hinter „Show“).

Die Breitbandigkeit der Antenne wird nochmals bestätigt, denn der Gewinn steigt von 10,5 dBi bei 2300 MHz auf ca. 12 dBi bei 2600 MHz. Bei 2450 MHz beträgt er genau 11 dB.

(Das untere Diagramm muss leer sein, denn laut der eingblendeten Meldung werden keine „front / back – Daten“ errechnet).

Man sollte sich auch noch selbst eine Freude machen und zusätzlich die Smithchart-Darstellung über den zugehörigen Button aufzurufen. Da sieht man fast noch besser, wie sich die Eingangsimpedanz benimmt:



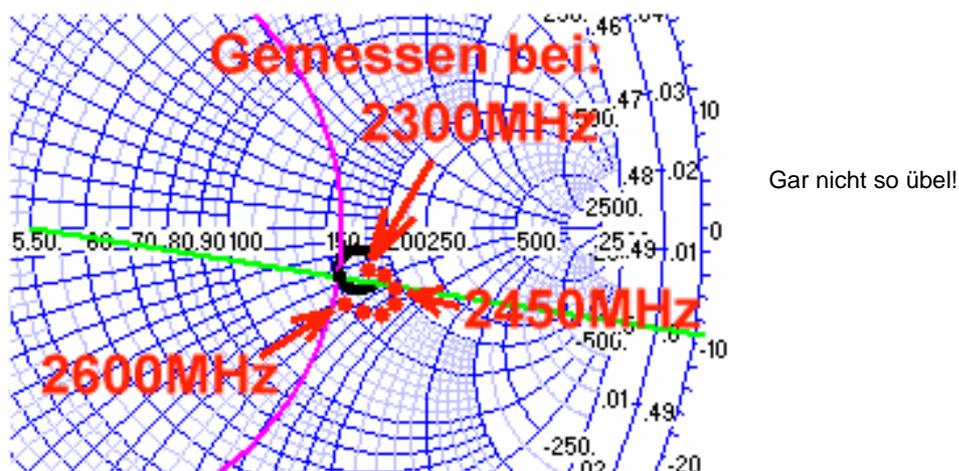
3.3. Messergebnisse beim Versuchsmuster

3.3.1. Eingangsimpedanz.

Dazu diente der gute alte Vektorielle Network-Analyzer „hp 8410“ mit dem Polardiagramm-Einschub und der zugehörigen Transmission-Reflection-Bridge für 2...12,4 GHz. Das Anregungssignal lieferte der Sweeper „hp 8690“ mit einem Einschub für 2...4 GHz, wobei der gewünschte überstrichene Frequenzbereich von 2300 bis 2600 MHz sorgfältig durch einen Zähler kontrolliert wurde. Dieser erhielt sein Signal vom Sweeper-Ausgang über einen 10 dB-Richtkoppler.

Bei der Kalibrierung des Messplatzes wurde allerdings etwas Aufwand getrieben:

- Perfekte Anpassung wurde durch einen SMA-Abschlußwiderstand der Firma Watkins-Johnson realisiert, der bis 12 GHz nie weniger als 30 dB Reflektionsdämpfung aufweist (...der Experte erkennt diese raren Teile auf dem Elektronikflohmarkt sofort an der schönen blauen Lackierung...). Damit wurde der Leuchtpunkt sorgfältig im Zentrum des Polardiagramms zentriert.
- Nun wurde der Widerstand durch ein kurzes Stück SMA-Semirigidkabel ersetzt, in das am Ende genau dieselbe SMA-Flanschbuchse eingeschraubt wurde, wie sie auch die Helixantenne verwendet. Dann wird zuerst auf 100% Reflektion kalibriert (= leuchtender Kurvenzug muss genau auf dem Außendurchmesser des Polardiagramms verlaufen) **UND** die Bezugsebene durch Verdrehen des zugehörigen Knopfes an der Messbrücke genau an die Spitze des Innenleiters bei der SMA-Buchse gelegt (= die Kurve schrumpft zu einem Leuchtpunkt zusammen). Damit messen wir genau am Anfang der Helixwendel, wenn nun die Antenne zur Messung angeschlossen wird. Und so sieht das Ergebnis aus:



3.3.2. Antenna Gain = Antennengewinn

Da war schon etwas Grübeleien erforderlich, denn in der heimischen Kellerwerkstatt steht kein Antennenmessplatz (und er hätte dort auch keinen Platz). Also wurde mit folgenden Tricks gearbeitet:

Bei einer Frequenz von 2450 MHz beträgt die Wellenlänge 122,4 mm. Baut man jetzt einen kompletten „Link“ (= eine Übertragungsstrecke, bestehend aus Sender und Empfänger) mit einer Streckenlänge (= Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne) von 120 cm auf, dann entspricht das einer Distanz von etwa 10 Wellenlängen und damit **einer echten Ausbreitung im Fernfeld**. Dann gilt:

Da sich die abstrahierte Energie beim Wegwandern von der Sendeantenne dauernd auf immer größere Raumwinkel verteilt, nimmt auf der Empfangsseite die Energie pro Flächeneinheit nach der „Friis“-Formel ab. Das ergibt die berühmte **Formel für die Freiraumdämpfung**. Sie lautet, wenn man die Gewinne von Sende- und Empfangsantenne einbezieht:

$$P_{\text{Empfang}} = P_{\text{Sender}} \cdot G_{\text{Sendeantenne}} \cdot G_{\text{Empfangsantenne}} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^2$$

„d“ ist dabei der Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne. Mit „λ“ ist natürlich die Wellenlänge gemeint, bei der die Berechnung erfolgen soll und die lässt sich ja immer über die Lichtgeschwindigkeit und die Sendefrequenz errechnen.

Sendet man nun mit einem genau bekannten Pegel und benützt zwei identische Antennen mit gleichem Gewinn, dann wird das Ganze sehr einfach, wenn man auf die logarithmische Darstellung in dB (mit den Leistungsangaben in dBm) umsteigt:

$$\text{Empfangspegel} = \text{Sendepiegel} + 2 \times \text{Antennengewinn} + 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d}\right) \quad \text{in dB}$$

Stellt man das nach dem Gewinn um, so erhält man:

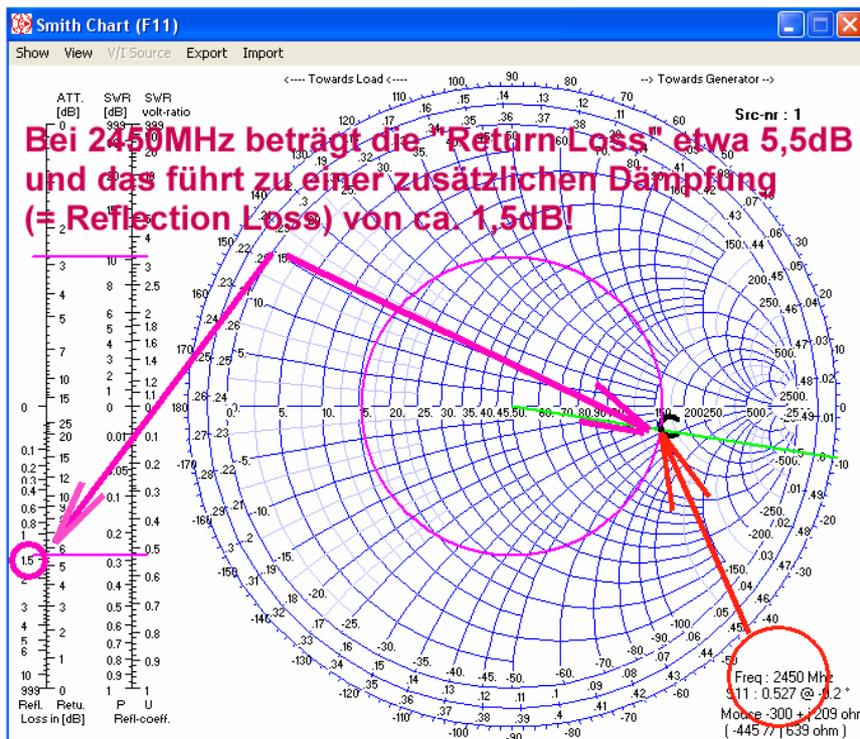
$$\text{Antennengewinn} = \frac{\text{Empfangspegel} - \text{Sendepiegel} - 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d}\right)}{2} \dots \text{in dB}$$

Nun wurde mit einem Pegel von 0dBm gesendet und der Antennenabstand von 120cm nochmals sorgfältig nachkontrolliert. Dann ergibt sich:

$$\text{Antennengewinn} = \frac{\text{Empfangspegel} - 20 \cdot \log\left(\frac{12,24\text{cm}}{4\pi \cdot 120\text{cm}}\right)}{2} = \frac{\text{Empfangspegel} + 41,8\text{dB}}{2}$$

Mit einer **Anzeige von -29dBm beim Empfänger** (= Spectrum Analyzer, auf 2,45 GHz abgestimmt) erhält man damit einen **Antennengewinn von 6,4 dBi** für die Patchantenne und etwa dieser Wert findet sich auch in den Lehrbüchern (meist: 6,5....7dBi, je nach Form und Werkstoff).

Jetzt wurde die Sendeantenne am Generator durch die Helixantenne ersetzt und dadurch stieg die Pegelanzeige am Empfänger um +2dB. Nun muss man aber berücksichtigen, dass der Eingangswiderstand der Helix bei ca. 150Ω liegt und dadurch ein großer Teil der maximal verfügbaren Leistung (von 0dBm = 1mW) in den Generator zurückreflektiert wird.



Die Bestimmung der dadurch auftretenden zusätzlichen Dämpfung ist ein Kinderspiel, denn links vom Smithdiagramm der 4NEC2-Simulation finden wir einige „Nomogramme“. Da sind die beiden unteren wichtig:

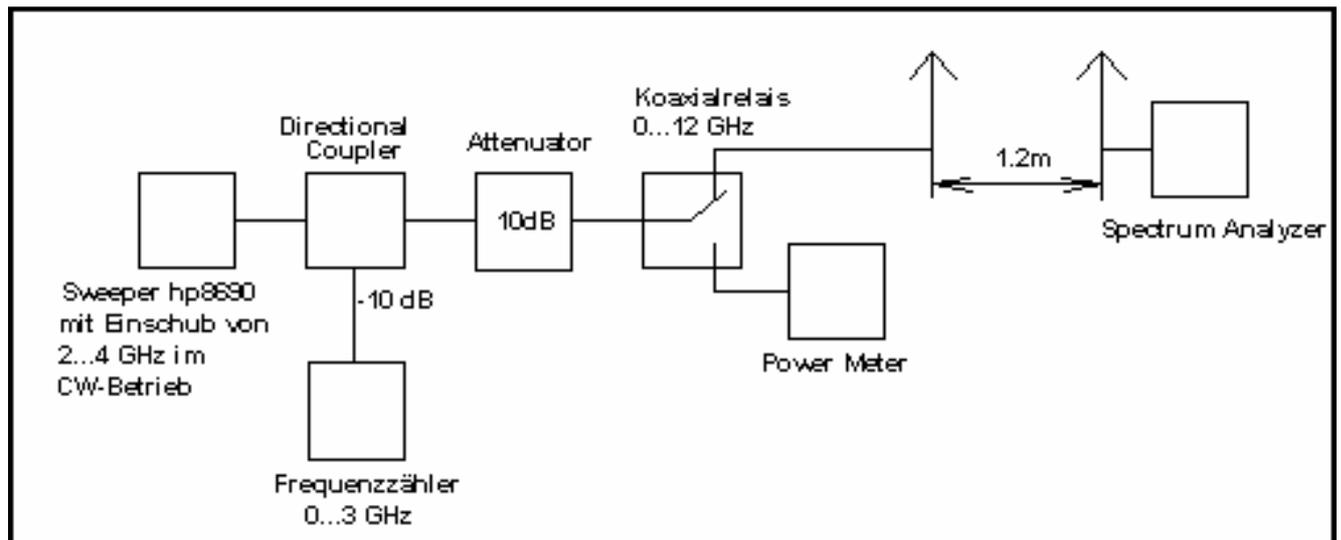
Für den Kurvenpunkt bei 2450 MHz ergibt sich an der rechten Skala eine „return loss“ von ca. 5,5 dB, die dem negativen Wert von S11 entspricht.

Die linke Skala liefert jetzt für die (durch die Reflektionen verursachte Zusatzdämpfung = reflection loss) einen Wert von etwa 1,5 dB.

Damit kommen wir zu einem gemessenen Gewinn der Helixantenne von 6,4dBi + 2dB + 1,5dB = 9,9dBi.

Das ist zwar um rund 1 dB weniger als die Simulation behauptet (= 11 dBi), aber so weit liegen wir auch wieder nicht daneben (denn 1dB entspricht 10%)und an die Verluste in unserer Styroporhalterung haben wir noch gar nicht gedacht.....und was wohl der Skinneffekt bei dieser Frequenz anrichtet....

Zum Abschluss folgt noch für Diejenigen, die das nachmachen wollen, ein Übersichtsplan des **Messaufbaus**:



Das Prinzip dürfte schnell klar sein:

Die Frequenz des Sendersignals wird von einem Zähler angezeigt, wobei ein Richtkoppler dafür ein Eingangssignal vom Hauptweg abzweigt. Nach einem Dämpfungsglied (zur Verbesserung der Anpassung) folgt ein Koaxialrelais. In der unteren Schalterstellung kann der vorgeschriebene Sendepiegel von 0 dBm geprüft und nachjustiert werden. Wird umgeschaltet, dann geht diese Leistung von 1mW an die Pachtantenne, bei der nahezu perfekte Anpassung vorliegt. Die Zuleitungen zum Power Meter und zur Patchantenne stellen zwei identische, gleich lange und verlustarme SMA-Semi-Rigid-Kabel dar und dadurch gelangt garantiert der exakt eingestellte Pegel von 0 dBm = 1 mW zur Antenne und wird abgestrahlt. Auf der Empfangsseite ist die dort angeordnete Patchantenne direkt auf den Analyzer-Eingang aufgeschraubt. Die beiden Antennen sind exakt im gegenseitigen Abstand von 1,2 m in reflexionsarmer Umgebung angeordnet.

4. Kommentar

Auch bei Drahtantennen ist nun kein reines Probieren mehr nötig, denn die NEC-Simulation nimmt einem den größten Teil der Arbeit ab und liefert -- wie gezeigt -- gut brauchbare Ergebnisse.

Allerdings ist der Einarbeitungsaufwand erheblich und es lauern überall irgendwelche Fallen, die zu Simulationsfehlern führen. Oft warnt NEC bzw. 4NEC2 nicht davor, da es diese speziellen Kenntnisse beim Anwender voraussetzt.

Auch konnte nur ein winziger Bruchteil dieses ungeheuer leistungsfähigen Programms mit seinen Möglichkeiten vorgestellt werden. Deshalb kann aus der **Homepage des Vortrag-Autors**

www.elektronikschule.de/~krausg

ein stetig wachsendes **4NEC2-Tutorial** mit allen möglichen Simulationsbeispielen und entsprechenden praktischen Hinweisen heruntergeladen werden (..English translation coming soon...). Allerdings gilt: wollte man alle Features des Programms besprechen und demonstrieren, dann käme man wohl auf einen Tutorial-Umfang von 1000....2000 Seiten.

Trotzdem: mit 4NEC2 macht das Austüfteln von Drahtantennen viel Freude, regt zu eigenen Taten an und schließt manche persönliche Bildungslücke. Viel Spaß an solchen Projekten wünscht Ihnen der Autor

Gunthard Kraus

Tettngang, im Juli 2010

Literatur: [1]: John D. Kraus und Ronald J. Marhefka: „Antennas for all Applications“. McGraw-Hill Higher Education. ISBN Nr.: 0-07-232103-2