Labor für Nachrichtentechnik an der Dualen Hochschule Baden Württemberg in Friedrichshafen

Simulation eines 435 MHz-Dipols mit 4NEC2

07. April 2019

Autor:
Gunthard Kraus, DG8GB, Oberstudienrat i. R.
Gastdozent an der Dualen Hochschule Baden Württemberg

Email: mail@gunthard-kraus.de
Homepage: www.gunthard-kraus.de

1. Einführung: 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. Dann wird das Verhalten jedes Segmentes berechnet und am Ende alles aufsummiert (= integriert). Damit lassen sich erstaunlich genaue Simulationen durchführen. Der Standard -- für den es viel, 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 in geringem Abstand parallel verlaufenden 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 (500$).

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 compiliertes 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. Richtiger Umgang mit 4NEC2

Es ist wichtig, die Spielregeln für eine erfolgreiche Simulation einzuhalten. NEC arbeitet nämlich nach der „Momentenmethode“, bei der die Antennenstruktur aus Drähten („Wires“) besteht und bei der jeder Draht selbst wieder in Segmente unterteilt wird. Dabei darf man folgende Vorschriften nicht verletzen:

Die **Länge jedes Segmentes** muss **kleiner als 5% bis maximal 10% der Wellenlänge** sein.

Bei der Drahtstärke muss man genau hinsehen, sonst handeln wir uns Probleme ein. Maßgebend ist dabei das **Verhältnis von Segmentlänge zu Drahtradius**:

Ist dieses **Verhältnis größer als 8**, dann reicht das normale Rechenprogramm mit dem Namen „**Thin Wire Kernel“** aus. Es simuliert den Stromfluss im Draht als einen hauchdünnen Stromfaden.

Bei einem **Verhältnis zwischen 2 und 8** muss der „**Extended Thin Wire Kernel“** über die Karte **„EK**“ im NEC-File aufgerufen werden. Damit wird der Strom rechnerisch gleichmäßig auf den Umfang des Drahtes verteilt und das erhöht die Genauigkeit beim Ergebnis beträchtlich.

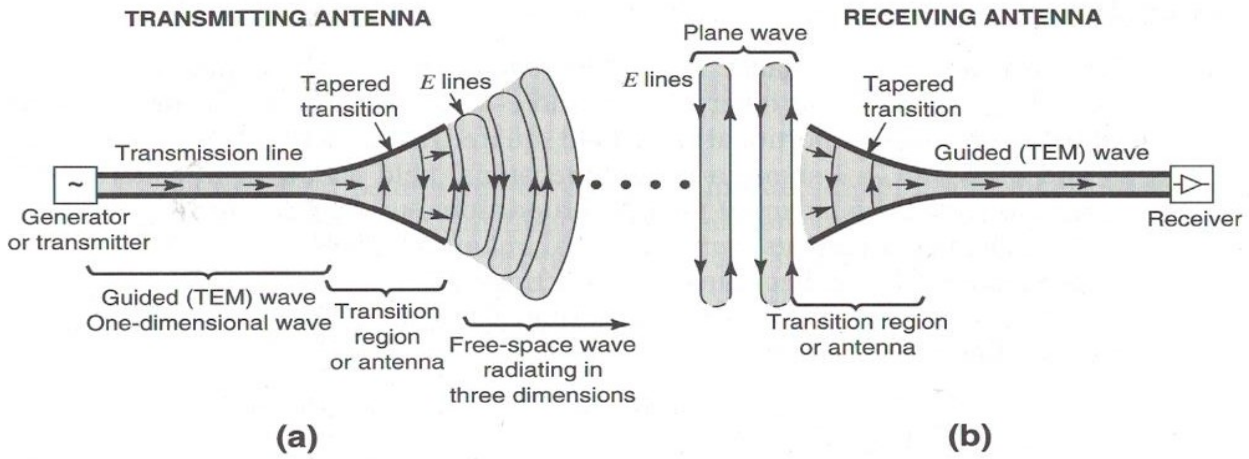
Für ein **Verhältnis unter 2** sinkt die Rechengenauigkeit sehr rasch, bleibt aber beim EK noch erträglich bis herunter zu einem Wert von 0,5.

Also wird 4NEC2 nun aus dem Internet geholt, entpackt und installiert. **Unbedingt gehört dazu der Download von NEC-2/MP.** Der Zusatz „MP“ bedeutet nämlich **„Multiprocessing“** und mit den darin enthaltenen überarbeiteten „exe“-Dateien erhält man eine deutlich höhere Rechengeschwindigkeit und so eine verminderte Wartezeit auf das Ergebnis. Der Download erfolgt von
http://www.ok1rr.com/files/NEC2MP.ZIP

In der Zwischenzeit scheinen diese „MP“-Dateien aber bereits im 4NEC2-Paket enthalten zu sein und werden deshalb bei der Installation automatisch einbezogen.

2.1. Antennengrundlagen

Dieses Bild (aus dem Standardwerk „Antennas“ von John D. Kraus) zeigt, was hinter der ganzen Sache mit der Abstrahlung durch eine Antenne steckt:



Ein Generator schickt elektrische Leistung in Form einer „guided (TEM) wave“ in eine Transmission Line. Diese Leitung geht am Ende in eine „Tapered region“ bzw. direkt in eine Antenne über und die „geführte Welle“ wird in eine „Freiraumwelle“ umgewandelt. Sie wird abgestrahlt, bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den freien Raum und dann wird der Prozess umgekehrt: aus der Freiraumwelle entsteht in der Empfangsantenne wieder eine geführte Welle. Sie erreicht schließlich den Empfänger und dort kann entweder der Strom, die Spannung oder die komplette Leistung ausgewertet werden.

So sehen die elektrischen Feldanteile der Welle bei der Abstrahlung aus. Die zugehörigen magnetischen Feldanteile (….beides gehört ja zur Leistung, denn die entspricht ja „Spannung x Strom“) stehen senkrecht auf den zugehörigen elektrischen Linien und müssten als Kreise dargestellt werden, die senkrecht aus diesem Blatt herauskommen bzw. senkrecht ins Blatt einmünden.

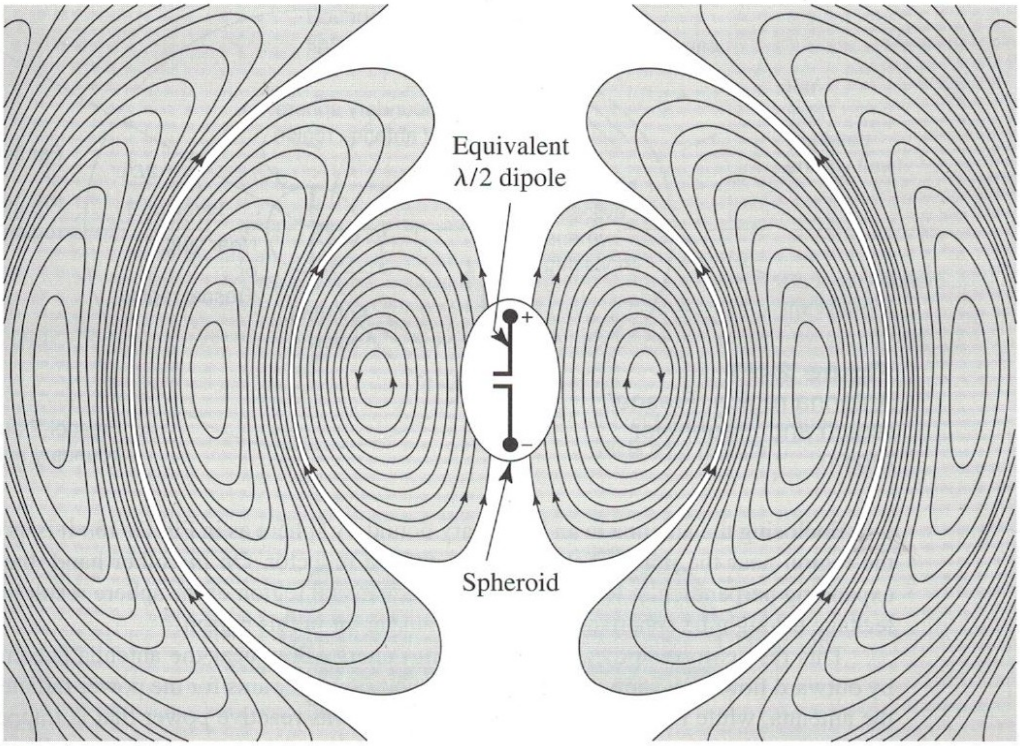


Figure 2–16
Electric field lines of the radiation moving out from λ/2 dipole antenna. (*Produced by Edward M. Kennaugh, courtesy of John D. Cowan, Jr.*)

Die Frage „**wie kommt diese Abstrahlung zustande**“ beantwortet dieses Bild. Darin ist dargestellt, wie sich die Feldlinie zwischen zwei sich bewegenden Punktladungen („charges“) verändert:

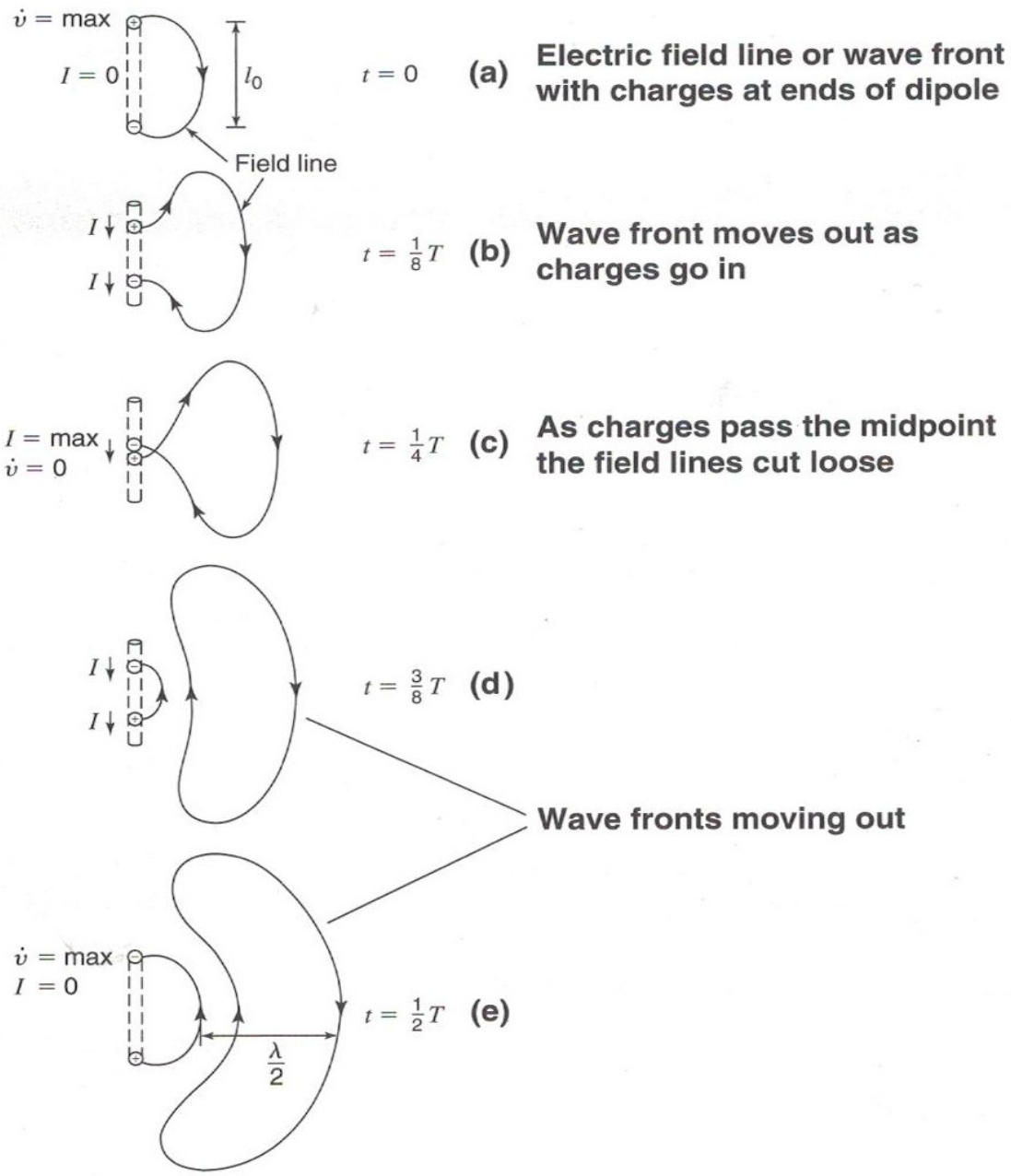
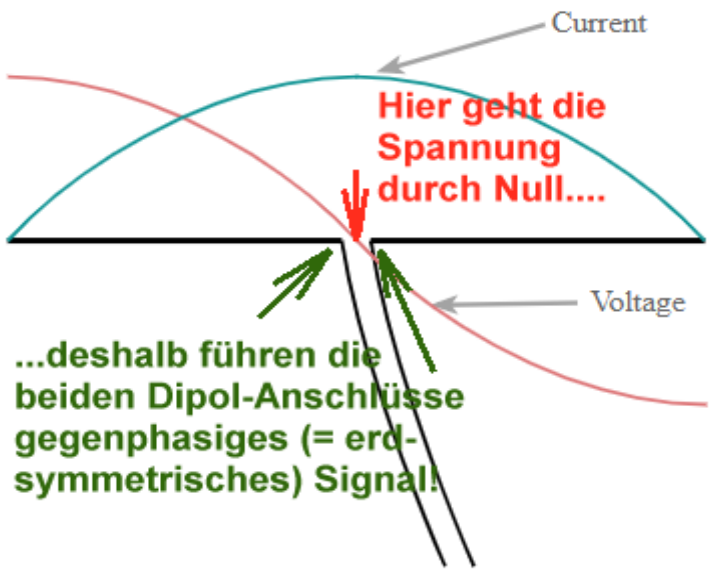


Figure 2–15
Oscillating electric dipole consisting of two electric charges in simple harmonic motion, showing propagation of an electric field line and its detachment (radiation) from the dipole. Arrows next to the dipole indicate current (I) direction.



Current and voltage waveforms on a half wave dipole

Und zum Abschuss noch die Strom- und Spannungsverteilung auf einem **Halbwellen-Dipol (= „Lambda- Halbe-Dipol“).**

Hier haben wir eine echte Resonanz (wie bei einem Schwingkreis) und der Eingangswiderstand ist dort reell. Er heißt **„Strahlungswiderstand“** und repräsentiert stets die abgestrahlte Wirkleistung. Sein Wert beträgt für diese Antenne ca. **71 Ohm.**

Verkürzt man die Strahlerlänge, so treten erstens (wie bei der Verstimmung eines Schwingkreises) **Blindanteile** auf. **Außerdem sinkt der Strahlungswiderstand sehr rasch auf immer kleinere Werte.**

Genau hinsehen:
dieser Dipol muss symmetrisch gespeist werden...

2.2. Erstellung des NEC-Files für einen 435 MHz-Dipol

Da gibt es mehrere Möglichkeiten und sie verstecken sich hinter „**Settings**“ im 4NEC2-Menü.Da findet man nacheinander:

Notepad Editor / NEC Editor / Geometry Edit / NEC Editor (new)

Aber dabei geht nichts über den **Notepad-Editor unter Windows**, denn mit ihm lassen sich bei zunehmender Erfahrung Änderungen und Erweiterungen am schnellsten einbringen und austesten. Allerdings darf man nie vergessen, beim fertigen File für den Dateityp „**Alle Dateien“** einzustellen und dann beim Dateinamen immer die Endung „***.NEC**“ anzuhängen.....

So müssen Standard-NEC-Files im Prinzip aufgebaut werden: es handelt sich um eine Folge von Anweisungen, die als „**Cards**“ = „Karten“ bezeichnet werden. **Denn die zugehörigen Details jeder Karte wurden früher auf IBM-Lochkarten gespeichert und deren Speichersystem (rows and columns = Reihen und Spalten) gilt noch heute:**

CM (= Comment = Kommentar)

' = Mit dem Hochkomma leitet man bei Bedarf eine Kommentarzeile ein

CE (= Comment End)

SY (Symbols = nun folgt eine Sammlung an Deklaration von Variablen für die verschiedenen verwendeten Faktoren oder physikalischen Größen oder Berechnungsgleichungen)

GW (Geometry of wire = Definition von Drähten mit allen nötigen Details)

GM (Geometry Move = Drehen, Verschieben oder Kopieren der erzeugten Struktur bzw. Teilen davon)

GE (Geometry End = Ende der Struktureingabe). Zusätzliche Eingabe des Groundtyps möglich.

LD (= Load = damit können z. B. zusätzliche Bauteile wie R, L, C bei bestimmten Segmenten eingebaut werden)

FR (= Frequency = Angabe der Frequenz oder des gesweepten Bereichs)

EK (= Extended Kernel = Programmzusatz zur korrekten Simulation von dünnen Drähten)

EX (= Excitation = Anregung der Struktur durch Zufuhr von Energie)

EN (= End = File Ende)

Die Details wollen wir nun am NEC-File unseres Lambda-Halbe-Dipol genauer ansehen.

Bitte beachten:
Alle Längen- oder Durchmesserangaben erfolgen IMMER in der Maßeinheit „Meter“!

```
CM Lambda - Halbe Dipol 70cm
CE
SY freq=435
SY dipolarm=300/freq/4
SY dr=0.002/2
GW 1 9   0  -dipolarm  0     0 dipolarm  0  dr
GM 10  1       0  0  0       56  0  0      1
GE
FR 0 1 0 0 freq
EK
EX 0 1 5 0 1 0
EN
```

Im Detail:
Rot geschrieben sind die Erklärungen – sie sind nur hier im Manuskript erlaubt! Zwischen den einzelnen Karten sollte man vorsorglich leere Kommentarzeilen (durch das **Hochkomma**) vorsehen.

CM Lambda - Halbe Dipol für 70 cm **= Kommentar**
CE **= Kommentarende**
'----------
SY freq=435 **= Es soll bei der Frequenz f = 435 MHz gearbeitet werden**

SY dipolarm=300/freq/4 **= Jeder Dipolarm hat die Länge „Lambda-Viertel“ bei 435 MHz. So kann man leicht auf eine andere Frequenz gehen!**

SY dr=0.002/2 **= Der Radius des Antennendrahtes beträgt 1 mm**

GW 1 9 0 -dipolarm 0 0 dipolarm 0 dr **= Nun müssen wir den Dipol als Wire definieren. Das geht so:**

1 **= Der Draht stellt „tag 1“ (= Objekt 1) dar**
9 **= Er wird in 9 Segmente aufgeteilt**
0 -dipolarm 0 **= xyz-Kordinaten des Drahtanfanges**
0 dipolarm 0 **= xyz-Kordinaten des Drahtendes**
dr **= Zum Schluß kommt noch der Drahtradius rein**
'
GE **= Geometry End = Ende der Stuktureingabe**

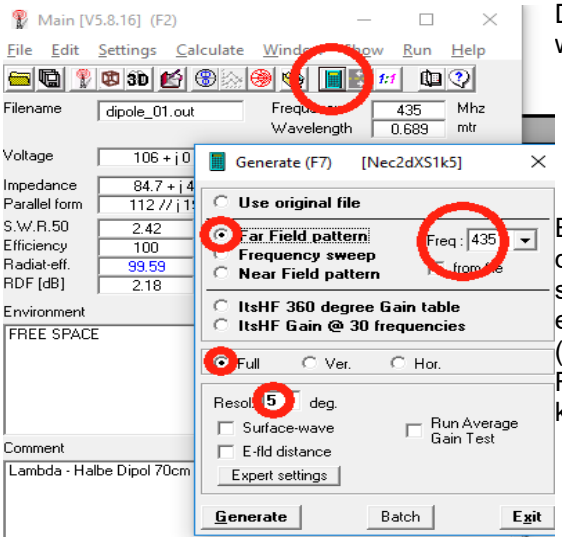
FR 0 1 0 0 freq 0 **= Programmierung des Sweep-Frequenzbereichs**

Erklärung:

0	**= Linearer Sweep**
1	**= Anzahl der Frequenzschritte (= hier nur eine Frequenz)**
0	**= beide folgenden Plätze auf der Karte müssen leer bleiben**
0	
freq	**= Startfrequenz**
0	**= Step size, also die Größe des Frequenzschrittes**
'	
EK	**= Extended Kernel = Zusatzprogramm für dünne Drähte aktiviert**
'	
EX 0 1 5 0 1 0	**= Excitation = Anregung bzw. Speisung mit Energie.**
0	**= Anregung durch Spannungsquelle (Stromquelle wäre „6“)**
1	**= Anregung in Tag 1.....**
5	**= ...und dort in Segment 5**
0	**= Leerer Platz auf der Karte**
1	**= Anregung durch eine reelle Spannung mit 1 Volt**
0	**= Kein imaginärer Spannungsanteil**
'	
EN	**= Ende des NEC-Files**

Hat man dieses NEC-File in Notepad fertiggestellt und mit der **korrekten Endung (*.nec)** gespeichert, dann braucht man nur noch die Software 4NEC2 zu starten und über „**File**“ und „**Open 4NEC2 in/out file**“ dieses File aufzurufen.

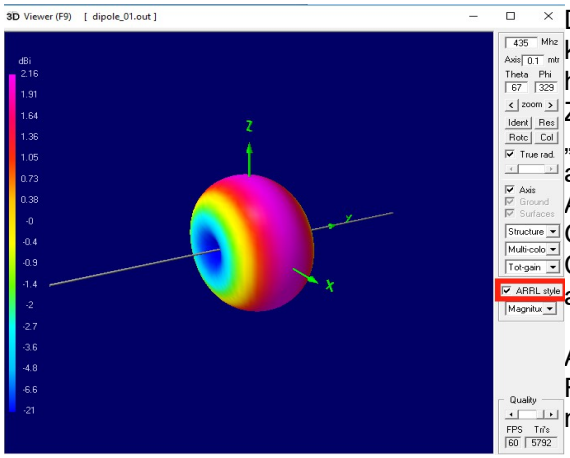
2.3. Simulation der Dipoleigenschaften



Dazu klickt man auf das **Symbol des Taschenrechners,** wählt „**Far Field pattern**“ und prüft die Einstellungen:

Frequenz = 435 MHz
Full
Resolution = 5 degrees

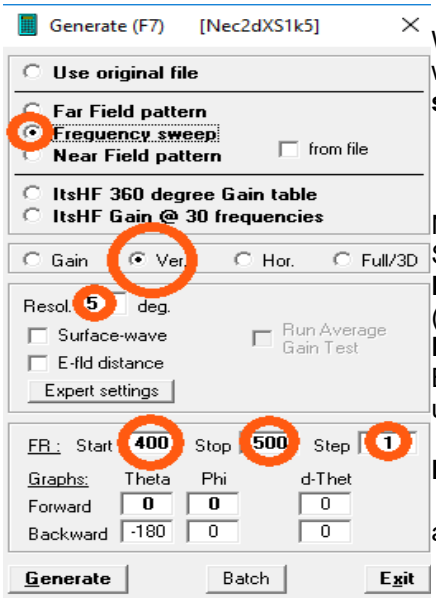
Ein Klick auf „**Generate**“ startet die Berechnung und Ausgabe der gewünschte Richtdiagramme. Man sollte sich aber gleich selbst eine Freude machen und die **Taste F9** drücken. Damit erscheint eine 3D-Darstellung der Antennenstruktur (...vorausgesetzt ist die Installation von „DirectX“ auf dem Rechner sowie eine Rechnerhardware, die damit umgehen kann....)-



Das Ergebnis ist eine hübsche 3D-Darstellung des Dipols. Er kann durch „Ziehen mit der Maus“ gedreht und herumgeschwenkt werden, seine Größe lässt sich über die Zoom-Tasten verändern. Im Untermenü mit der Angabe „**hide pattern**“ finden wir aber „**Multi-color**“ und wer das anklickt, bekommt folgendes Bild auf den Schirm. Auch da stellt man sich mit den Zoom-Tasten eine passende Größe des Strahlungsdiagramms ein und genießt die Codierung der Gewinnwerte in **„dBi“** durch die links angeordnete Farbskala.(Maximalwert: 2,15 dBi).

Allerdings ist da eine ganz wichtige Bemerkung nötig: Rechts unten ist ein Häkchen bei „**ARRL**“ gesetzt. Da wird mit einer komplett anderen logarithmischen Skala gearbeitet

und dadurch der **Bereich von +2,15 dBi bis -4,7 dBi stark gedehnt dargestellt**, während es ab -4,7 dBi mit einem winzigen Ruck gleich zu -21 dBi hinuntergeht.
Hat seine Vorteile, wenn man das absolute Minimum zwar noch erkennen will, aber den größeren Wert auf eine gute Auflösung legt, wenn es in Richtung Maximum geht.
Man braucht ja nur kurz das Häkchen bei „ARRL“ entfernen um den Unterschied zu sehen: dann haben wir eine korrekte (= dB-lineare) farbige dBi-Teilung vor uns und die Dehnung in der Nähe des Maximums ist verschwunden. Muss man ausprobieren und dann selbst entscheiden, was praktischer ist..

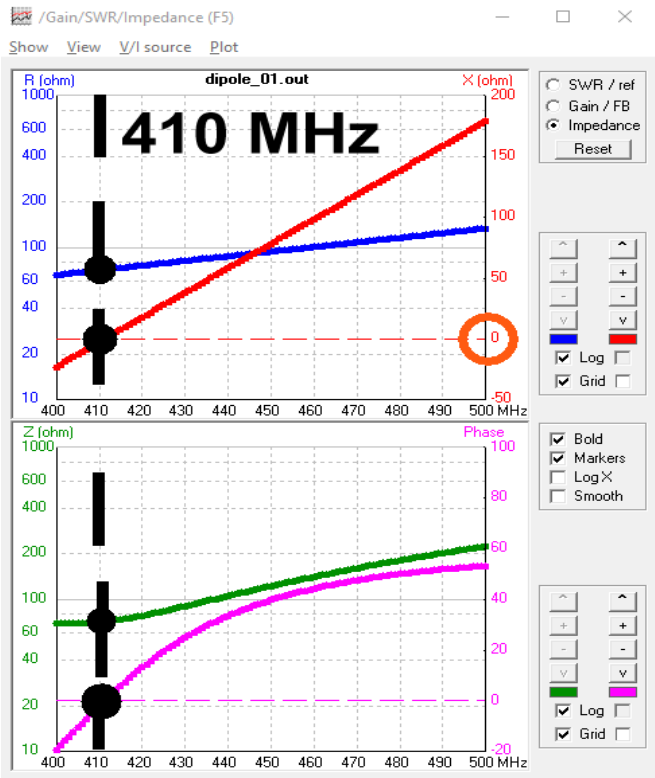


Wer sich für den Verlauf der Eingangsimpedanz interessiert, der wählt wieder die „Taschenrechner-Taste“ und schaltet dann auf „**Frequency sweep**“ um.

Natürlich darf man nicht vergessen, den Sweep-Bereich und die Schrittweite anzugeben. Gewählt wurde ein Bereich von **400 bis 450 MHz** mit einer **Schrittweite von 1 MHz**, die übrigen Grundeinstellungen (z. B. Winkelauflösung = 5 Grad) bleiben unverändert, **aber das Programm schaltet dabei selbständig auf „Vertikal“ um.** Die Berechnung dauert nun wenig länger und man kann beim Ergebnis unter der

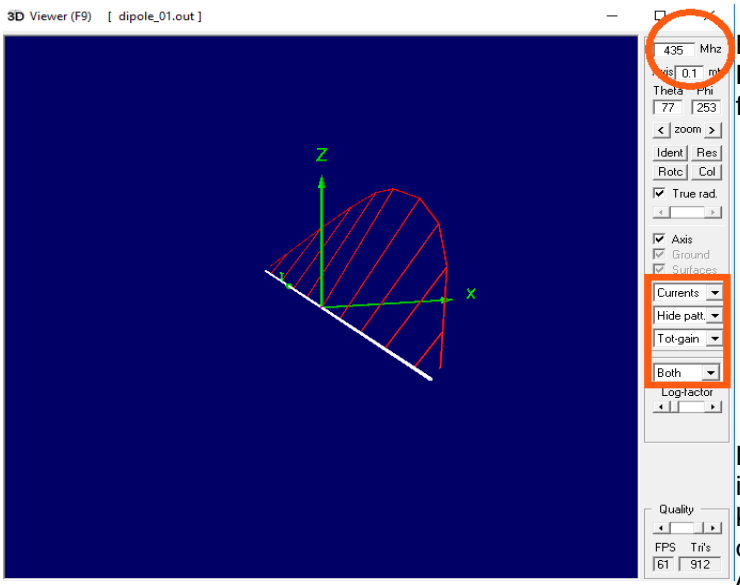
Darstellung von SWR, Reflektionsfaktor, Gain oder Impedance

auswählen. **Wir brauchen „Impedance“.**



Sehen wir uns den ermittelten **Eingangsimpedanzverlauf** genauer an. Da erkennen wir, dass die Antenne eine gehörige „Open End Extension“ wie jede am Ende offene Microstrip-Leitung aufweist. **Dadurch sinkt die Resonanzfrequenz bis auf 410 MHz ab!**

Interessant ist auch der Stromverlauf auf dem Dipol und der Vergleich mit der Theorie.



Bitte wieder „F9“ aufrufen, die **Frequenz 435 MHz einstellen** und im markierten Kästchen folgende Einstellungen vornehmen:

Currents

Hide Pattern

Tot-gain

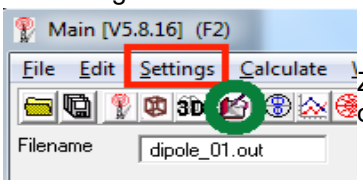
Both

Man erkennt nun sehr schön den Stromverlauf in Form einer Sinus-Halbwelle. Aber 4NEC2 kann noch mehr, denn die Kurve ist genau um den Phasenwinkel des Stromes gegen die Z-Achse geneigt, da wir mit der Resonanz bei 410 MHz noch falsch liegen und bei 435 MHz simulieren....bei Resonanz steht die Kurve genau senkrecht und diese Richtung entspricht immer der Phase bei der Spannung...

Zur **Korrektur der Resonanzfrequenz** sieht man einen zusätzlichen **Verkürzungsfaktor „kf“** als neues Symbol für die Dipol-Armlängen im NEC-File vor und spielt etwas mit seinem Wert.

Mit kf = 0,9425 (= ergibt sich aus 410 / 435) erhält man dann genau die gewünschte Resonanzfrequenz von 435 MHz.

Und das geht so:



Zuerst rufen wir im „Main“-Menü die **Settings** (= roter Rahmen) auf und prüfen, ob der **Notepad-Editor** (= erste Option) vorgewählt ist.

Ein Klick auf den Editor-Button (= grüner Kreis) öffnet dann das benützte NEC-Input File. **Darin wird der Korrekturfaktor als zusätzliches Symbol „kf=0.9425“ eingefügt. Die y-Koordinaten der beiden verwendeten Wires werden zusätzlich mit diesem Faktor multipliziert:**

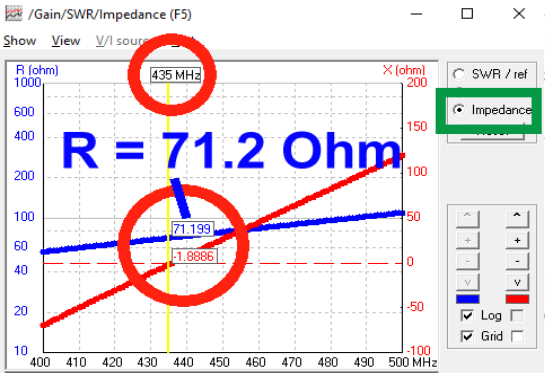
```
=====================================================
CM Lambda - Halbe Dipol für 70cm
CE

SY freq=435
SY dipolarm=300/freq/4
SY dr=0.002/2
SY kf=0.9425                    ' Korrekturfaktor für korrekte Resonanz bei 435 MHz

GW 1 9     0  -dipolarm*kf  0     0  dipolarm*kf  0     dr
GE
FR 0 1 0 0 freq
EK
EX 0 1 5 0 1 0
EN
```

GANZ WICHTIG:
Nach der Änderung im NEC-File wird das Datei-Menü im linken oberen Eck des Editors geöffnet und „Speichern“ gewählt . Dadurch schließt sich das Menü wieder. Aber wir öffnen es nochmals und klicken darin auf „Beenden“.
Wer das nicht macht, handelt sich unwahrscheinlichen Ärger ein, denn ohne „Beenden“ werden die Ergebnisse der vorherigen Aktion nicht gelöscht, sondern die Simulationsergebnisse unserer Änderung einfach dazu geschrieben. Das gibt unglaublich wirre Ergebnisse (...= eigene Erlebnisse mit etlichen Stunden Fehlersuche...)**!**

Aufgabe:
Simulieren Sie nun (mit der um den **Faktor kf = 0.9425** korrigierten Antennenlänge) einen Frequency Sweep von 400 bis 450 MHz und prüfen Sie, ob diese Korrektur ausreicht. Kontrollieren Sie anschließend auch die Phasenlage des Stromes wie im vorigen Beispiel im Bild F9. Bestimmen Sie den genauen Wert des Eingangswiderstandes.



Sobald man mit der linken Maustaste auf die blaue Kurve klickt, wird ein „Mess-Cursor“ als gelbe Linie eingeblendet, die sich mit den waagrechten Pfeiltasten verschieben lässt.

So findet man:

R = 71,2 Ohm

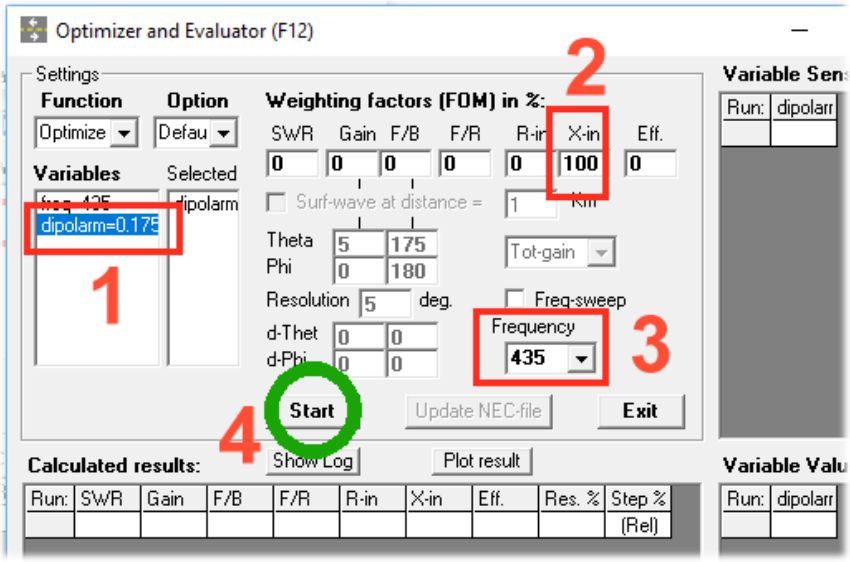
bei f_{res} = 435 MHz und das sagt auch die Theorie...
(...die Phase ist dort nun natürlich Null Grad...)

2.4. Einsatz der Optimizer-Option zur Bestimmung der nötigen korrekten Dipollänge für 435 MHz

4NEC2 ist sehr schlau und deshalb können wir die erforderliche Verkürzung vom Programmteil „Optimizer“ ermitteln lassen. Aber der nimmt sogar auf Wunsch gleich die nötige Änderung im NEC-File vor!
Dazu bringen wir das NEC-File in folgende Form und merken uns die für künftige Projekte:

```
CM Lambda - Halbe Dipol 70cm
CE
SY freq=435
SY dipolarm=0.175        ' Hier muss immer ein Zahlenwert bei der Optimierung stehen!!
                         ' Deshalb wurde einfach der ideale Wert „17.5 cm“ (= Lambda
                         ' -Viertel in Luft) eingetragen
SY dr=0.002/2
GW 1 9   0  -dipolarm  0     0 dipolarm  0  dr
GE
FR 0 1 0 0 freq
EK
EX 0 1 5 0 1 0
EN
```

Ein **Druck auf F12** öffnet das Optimizer-Menü und wir nehmen folgende Einstellungen vor:



1: Wir wollen die Dipol-Armlänge optimieren (und dadurch die Resonanzfrequenz auf 435 MHz bringen). Also klicken wir in der Liste „Variables“ darauf

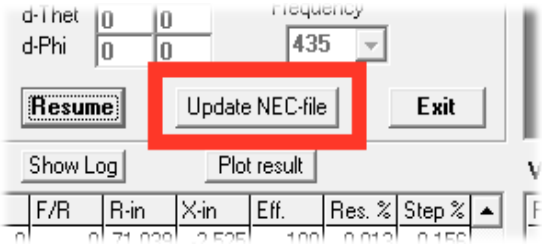
2: Das entscheidende Kriterium (Gewichtsfaktor = 100%) ist, dass der Blindanteil der Eingangsimpedanz zu Null gemacht werden muss.
(Hinweis: Bitte nach einem Rechtsklick auf dieses Fenster kontrollieren, ob auch **„Minimize“** eingestellt ist)

3: Ein Blick auf die gewählte Frequenz (hier: 435 MHz) schadet nicht....

4: ...und dann kann gestartet werden!

Damit nimmt der Optimizer seine Arbeit auf und werkelt solange, bis er das Optimum gefunden hat. Er meldet uns anschließend die Zahl der dazu erforderlichen Steps sowie die benötigte Zeit.
Bestätigen wir das mit OK, so können wir für eine Übernahme des Ergebnisses in unser NEC-File stimmen.

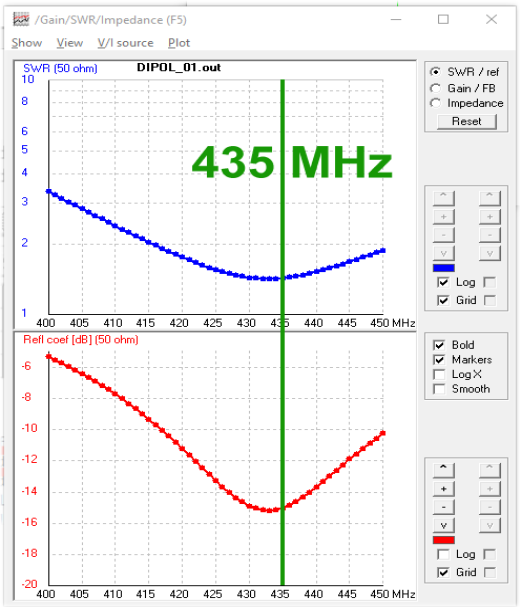
Hier haben wir die **richtige Taste**...

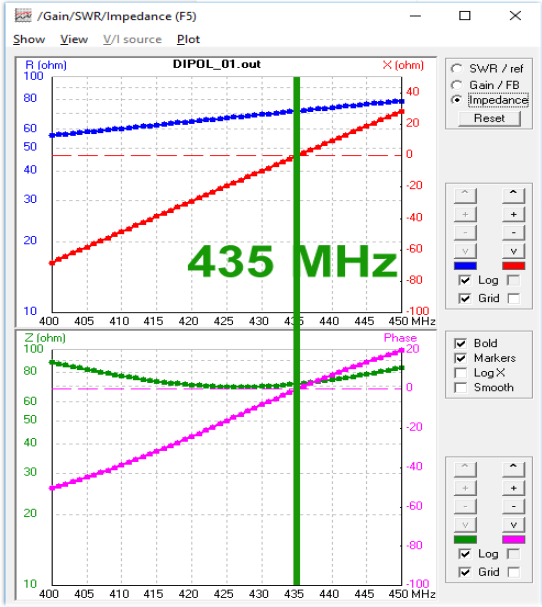


.hier die **Änderung im NEC-File**....

```
CE
SY freq=435
SY dipolarm=0.162833
SY dr=0.002/2
GW 1 9    0  -dipolarm
GM 10  1
```

...und hier den Erfolg: **SWR bzw. S11** oder **R und X bzw. Z und Phase**





Man kann diese **Optimierung durch einen Klick auf „Resume“ (sogar mehrfach) wiederholen**. Aber das Ergebnis ändert sich nur noch ab der dritten Stelle nach dem Komma...lohnt also eigentlich nicht...

3. Simulation einer Übertragungsstrecke

3.1. Eine zweite Antenne muss her

Mit NEC lassen sich auch Simulationen im Fernfeld durchführen und das kann man ausnützen, um z. B. später die genauen Eigenschaften anderer simulierter Antennen zu untersuchen. **Man ordnet dabei einfach einen „Messdipol“ in ausreichendem Abstand an, dreht und wendet diesen nach Geschmack und ermittelt jedes Mal den fließenden Strom oder die Empfangsleistung in seinem Abschlusswiderstand.**

Addieren wir also in unserem NEC-File „dipol_01.nec“ einen identischen Dipol (durch Kopieren der Originalantenne) in **x = 7 Meter** Abstand. Das entspricht 10 Wellenlängen bei Lambda = 70 cm und somit einen sicheren Betrieb im Fernfeld . Außerdem bringen wir in der **Mitte dieses Empfangsdipols einen Abschlusswiderstand** an, dessen **Wert genau dem Innenwiderstand des Dipols (= seinem Strahlungswiderstand) von 71,2 Ω entspricht**. Dann erhält das neue NEC-File folgende Form.

```
CM Lambda - Halbe Dipol 70cm
CE
SY freq=435
SY dipolarm=0.162833
SY dr=0.002/2
GW 1 9     0  -dipolarm  0    0 dipolarm  0  dr
GM 10  1 0  0  0     7  0  0     1
GE
LD 0  11  5  5  71.2
FR 0 1 0 0 freq
EK
EX 0 1 5 0 1 0
EN
```

Schauen wir uns die erste rote Zeile genauer an, denn das ergibt die zweite Antenne:

GM	= **Geometry move** = damit wird eine Kopie erzeugt
10	= Tag incement. Damit wird diese Antenne als „**tag 10+1 =tag 11**“ verwaltet
1	= wir wollen nur **eine Kopie** erzeugen
0 0 0	= keine Rotation um irgend eine Achse vorsehe
7 0 0	= verschiebe die Kopie um **7 Meter in X-Richtung**
1	= beginne den Kopiervorgang ab **tag 1** (= ursprüngliche Antenne)

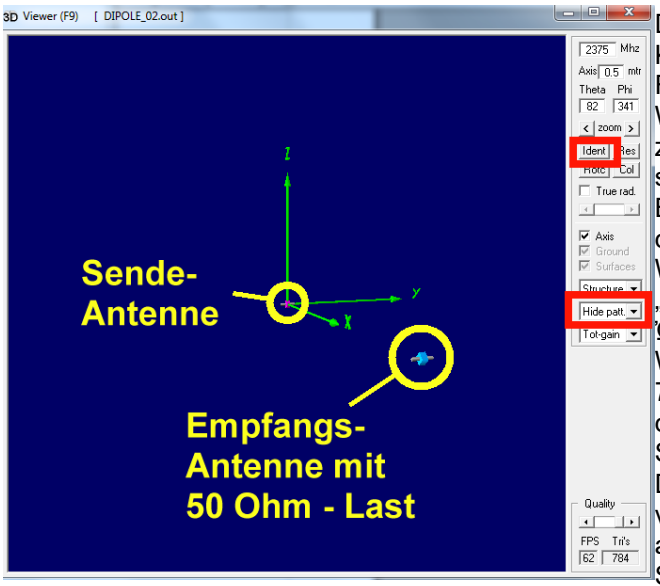
Und mit der zweiten roten Zeile fügen wir in der Mitte der neuen Empfangsantenne einen Lastwiderstand mit 71.2 Ω ein:

LD	= **Load card.** Damit können wir z. B. Bauteile hinzu fügen
0	= wir verwenden eine RLC-Anordnung
11	= eingefügt wird in den Wire der neue Antenne, der **tag 11** (= 10 +1) heißt
5 5	= eingefügt wird zwischen Anfang und Ende von seinem **Segment 5** (= Drahtmitte)
71.2	= eingefügt wird ein Ohmscher Widerstand mit 71.2 Ω. L und C würden folgen, haben aber beide den Wert Null

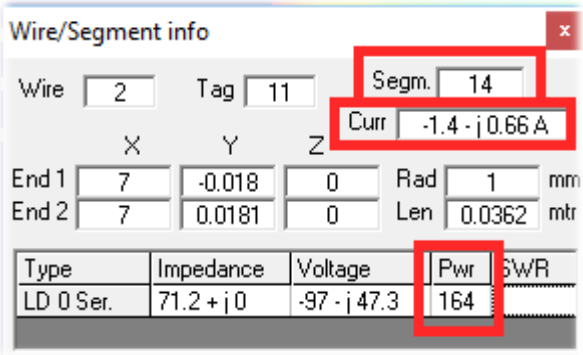
Zum Abschluss gehen wir in „**Settings**“ im Hauptmenü und öffnen „**Input Power**“. Dort geben wir eine **Sendeleistung von 1 Megawatt** (= 1000000 = 1e6) ein, damit sich auch in größeren Entfernungen noch etwas rührt und sind somit bereit für weitere Taten.

Bitte die Änderungen im NEC-File eintragen und wieder mit der korrekten „Zweistufen-Prozedur“ abschließen. **(Reihenfolge: Ändern / Speichern / Schließen / wieder öffnen / „Beenden“ anklicken)**

3.2. Das Ergebnis der Fernfeld-Simulation



Die Simulation erfolgt exakt nach der Prozedur in Kapitel 2.3 – aber die 3D-Darstellung über die Taste F9 ist hier sehr hilfreich.
Wenn darin „**hide pattern**“ aktiv ist und wir gefühlvoll zoomen, dann haben wir dieses Bild vor uns. Darin sehen wir die Sendeantenne mit einer violetten Bauchbinde, die kennzeichnet die Einspeisung. Bei der Empfangsantenne sitzt dagegen ein hellblauer Würfel auf dem mittleren Segment – er stellt die „Load“, also den eingefügten Lastwiderstand mit 71.2 Ω, dar.
Wir interessieren uns für die Empfangsleistung im 71.2 Ω-Widerstand und klicken deshalb doppelt auf die Taste **„Ident**“. Da können wir das gewünschte Segment eingeben und es trägt die **Nummer „14**“. Das ist einfach zu verstehen, denn alle vorkommenden Segmente werden der Reihe nach aufgelistet und jede Antenne besteht aus 9 Segmenten. **Also finden wir die Mitte der Empfangsantenne bei Segment „9 + 5 = 14“.**



Hier sehen wir das Ergebnis und wir finden darin neben allen übrigen Daten eine **Empfangsleistung von 164 Watt sowie einen Strom von -1,4 - j0,66 A.**
Nun können wir prüfen, ob wir uns wirklich im Fernfeld befinden und ob 4NEC2 die Verhältnisse korrekt berechnet.

GM 10 1 0 0 0 7 0 0 1

Dazu wiederholen wir die Simulation mehrmals und verdoppeln jeweils den Abstand der beiden Antennen (**also 14m / 28m / 56m/112m usw. bei X eintragen**). Das geht sehr einfach, denn wir brauchen nur beim Editor mit dem geöffneten NEC-File in dieser Zeile die rot gekennzeichnete Eingabe der X – Verschiebung zu ändern, zu speichern, nochmals zu starten, „Beenden“ anzuklicken und dann zu simulieren.

Jetzt kann man jedes Mal den Strom in Segment 14 ansehen. Die Ergebnisse lauten

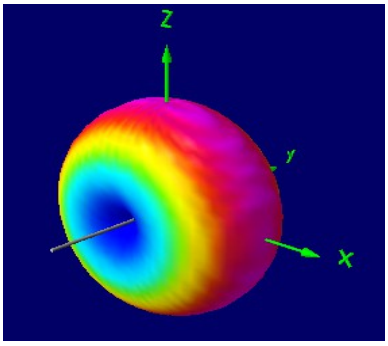
für 7m:	**I = - 1,4 – j0,66**	**(P =164 W)**
für 14m:	**I = - 0,7 + j0,38**	**(P = 41 W)**
für 28m:	**I = 0,3 + j0,23**	**(P = 10.3 W)**
für 56m:	**I = - 0,2 + j0,03**	**(P = 2,57 W)**
für 112m:	**I = - 0,02 + j0,09**	**(P = 0,64 W)**

Man sieht, dass die Feldstärke und damit der Strom mit steigendem Abstand linear abnimmt und damit die Leistung quadratisch sinkt. Das entspricht genau der Theorie und stärkt das Vertrauen zum Programm doch sehr.

Noch ein Test ist interessant: wenn man beim Empfangsdipol eine **Rotation von 90 Grad um die X – Achse** vornimmt (= seine Polarisation von Horizontal auf Vertikal ändert), sollte die **Empfangsleistung auf Null sinken**. Also geht man wieder ins NEC-File und sieht eine entsprechende **Rotation um die X – Achse** bei der GM-Karte und 7 m Abstand der Antennen (mit der vorgeschriebenen folgenden Speicherprozedur) vor:

GM 10 1 90 0 0 7 0 0 1

Die Simulation bestätigt das ohne Probleme.



Hinweis:

Zur Vorschrift „**Messung nur im Fernfeld**“ sollte man sich zusätzlich dieses Bild ansehen. Noch beim **Abstand von 7m zwischen beiden Antennen (...also bei rund 10 Wellenlängen)** sieht man die **Rückwirkungen der Empfangsantenne auf das Richtdiagramm des Sendedipols**. Sie zeigen sich als „Kräuselung“ des Richtdiagramms und verschwinden erst bei erheblich größeren Distanzen.

4. Symmetrie und Mantelwellen

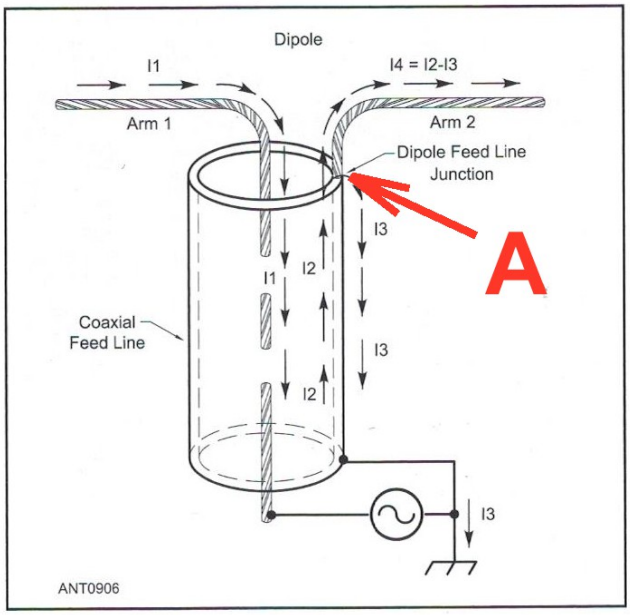


Figure 24.48 — Drawing showing various current paths at feed point of a balanced dipole fed with unbalanced coaxial cable. The diameter of the coax is exaggerated to show currents clearly.

Da brauchen wir dieses Bild aus dem **„ARRL Antenna Book“.**

Ein Problem haben wir am Hals, wenn wir den Dipol (...der ja **symmetrisch angesteuert werden muss**...) einfach über **ein Koaxialkabel an den speisenden Generator anschließen und damit unsymmetrisch speisen.**
Sehen wir uns das Ganze näher an.

a) Im **Inneren des Kooaxialkabels fließen zwei gegenphasige Ströme I1 und I2 mit gleicher Amplitude**, nämlich „Hinleitung“ und „Rückleitung“.

Beim Strom I1, der über den Mittelleiter des Kabels läuft, ist es einfach: er kommt vom Arm 1 des Dipols.

Beim Strom I2, der auf der **Innenseite des Koaxialkabels** hoch läuft, wird es interessant: Sobald er das Innere des Kabels verlässt und Punkt „A“ erreicht, gibt es nicht nur den Weg in den Arm 2 des Dipols, sondern auch

die Möglichkeit, dass der Teil I3 auf der Außenseite des Kabels in Richtung Masse fließt – sobald von diesem Punkt eine Spannung gegen Masse existiert. Welche Spannung sich bei „A“ ausbildet und wie groß dieser „Mantelstrom I3“ ist, hängt vor allem von der Impedanz ab, die zwischen Punkt „A“ und Masse durch den Kabelmantel gebildet wird! Dieser Stromanteil I3 fehlt dann natürlich beim rechten Arm 2....

Welche Folgen hat das?

A) Die Ströme I1 und I4 in den beiden Dipolarmen sind plötzlich nicht mehr gleich – das muss Auswirkungen auf das Strahlungsdiagramm und auch auf den Eingangswiderstand haben.

B) **Der Dipol erzeugt (wegen der waagrecht angeordneten Arme) eine horizontal polarisierte Abstrahlung, parallel zum Strom.**

(Einfache Merkregel:
es strahlt immer der Strom und das erzeugte bzw. abgestrahlte elektrische Feld ist stets parallel zur Strombahn polarisiert)

Auf dem Außenmantel des Koaxialkabels fließt aber der Strom I3 **senkrecht** nach unten. **Durch ihn entsteht zusätzlich ein abgestrahlter vertikal polarisierter Feldanteil! Er verändert ebenfalls das Richtdiagramm.**

C) Der Mantelstrom I3 kann über alle möglichen Wege in der Funkbude seinen Weg zu Erde suchen. Das gibt oft Probleme mit **Einstreuungen oder Einkopplungen in andere Geräte, z. B. über die Netzkabel der Stromversorgung** usw.

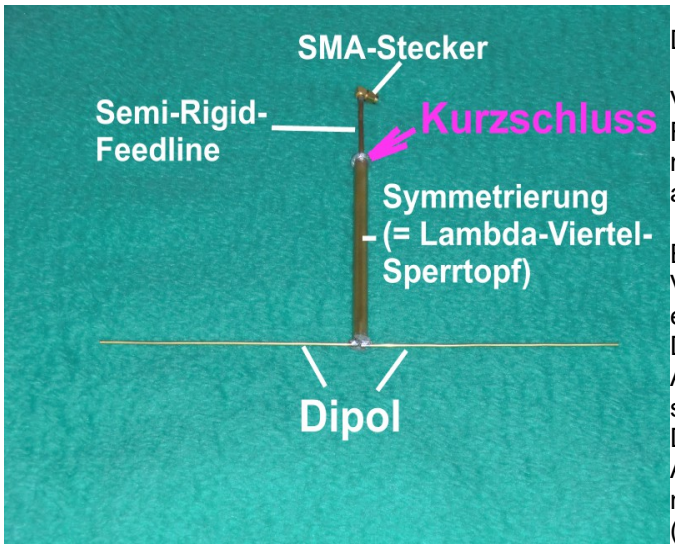
D) Ein ganz unangenehmer Sonderfall ist möglich:
Wenn das Kabel bzw. der Weg des Mantelstroms nach Masse genau eine **halbe Wellenlänge** beträgt, dann wird die Masseverbindung (= Kurzschluss) am unteren Ende an den Eingang dieser „Leitung“, also an Punkt „A“, transformiert. Theoretisch **kann dann der Eingangsstrom I4 in den rechten Dipolarm sogar Null werden** (….in der Praxis ist I4 in diesem Fall meist nur deutlich vermindert gegenüber I1). Das gibt ein interessantes neues Richtdiagramm.....

Abhilfen gegen diesen unangenehmen Effekt:

Entweder man ergänzt die Antenne gleich um eine **anständige Symmetrier-Einrichtung**.

Oder man erhöht deutlich die Impedanz von Punkt „A“ gegen Erde. Das geschieht meist durch eine Ladung von Ferrit-Ringen, die über das Koaxialkabel geschoben werden. (Sie sind auch in geteilter Form als „Klappferrite“ im Internet erhältlich)

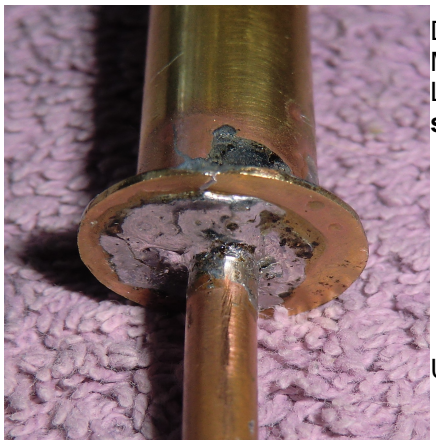
5. Praktische Ausführung der Antenne



Die ist nicht schwer zu verstehen:

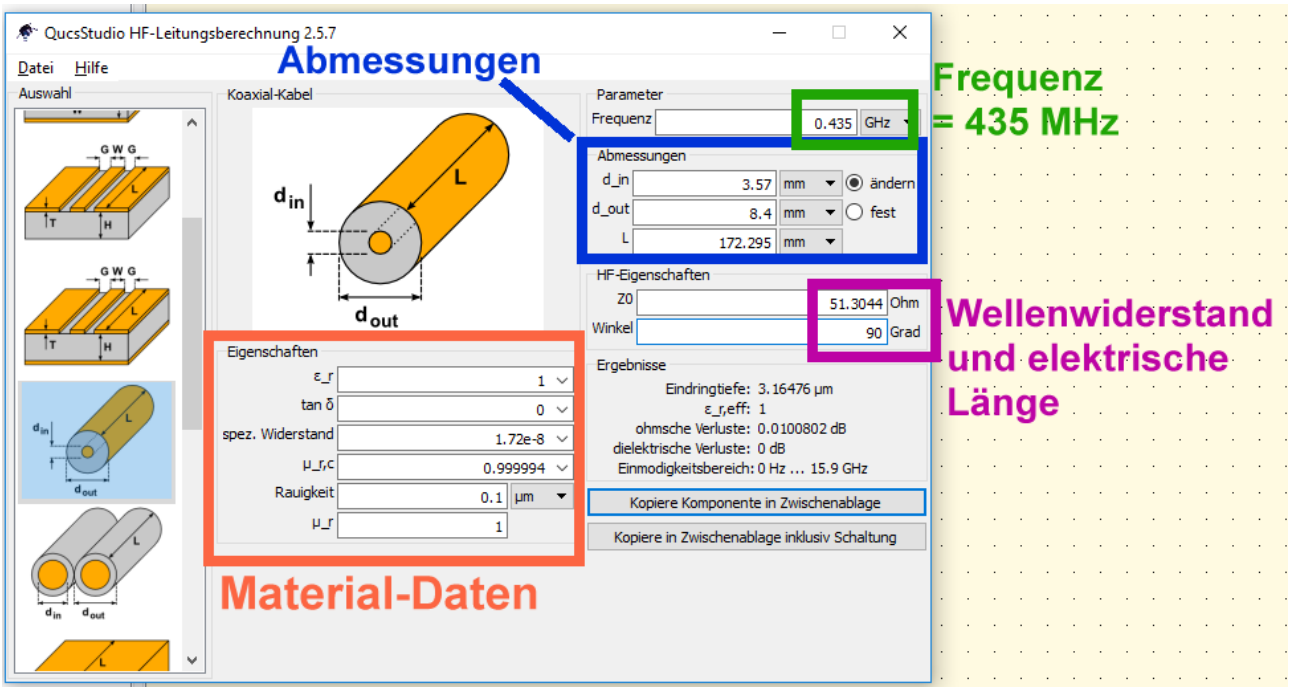
Von oben her kommt die Speiseleitung als Semi-Rigid-Kabel (= Kupferrohr mit Teflon-Füllung und massivem versilbertem Draht als Innenleiter) mit angelötetem SMA-Stecker.

Es folgt die Symmetrier-Einrichtung (= Lambda-Viertel-Sperrtopf) und mit dem so erzeugten erdsymmetrischen Signal wird der Dipol gespeist. Das Semi-Rigid-Kabel besitzt einen Außendurchmesser von 3,57 mm Durchmesser. Es steckt in einem Messingrohr mit 10 mm Durchmesser und einer Wandstärke von 0,6 mm. Also bildet der Kupfermantel des Kabels zusammen mit dem Innendurchmesser des Messingröhrchens (= 8,4 mm) eine Koaxial-Leitung mit Luft als Dielektrikum und einem Wellenwiderstand von ca. 50 Ohm. Ihre elektrischen Daten lassen sich hervorragend mit dem neuen Leitungscalculator in der aktuellsten Qucsstudio-Version 2.5.7. bestimmen.



Durch den **Kurzschluss am Ende dieser Leitung** (= aufgelötete Messingscheibe, Siehe dieses Bild) erscheint am Eingang wegen ihrer Länge L = λ / 4 =172,3 mm) **ein Leerlauf und damit ein erdfreies symmetrisches Signal zur Speisung des Dipols.**

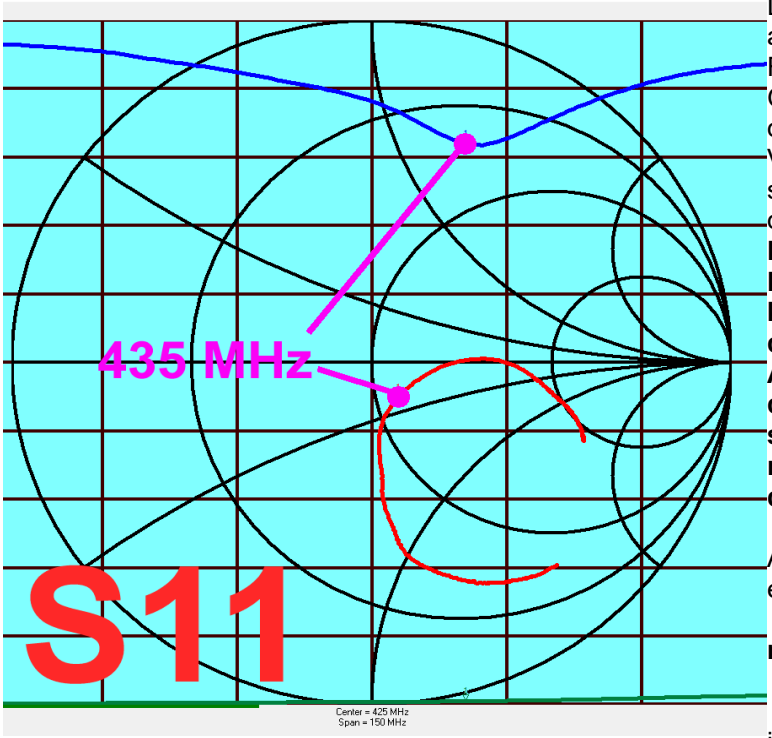
Und so geht man mit dem Leitungscalculator im Qucsstudio um:



Er liefert für den Sperrtopf einen **Wellenwiderstand von 51,3 Ohm** und die erforderliche Röhrchenlänge beträgt **172,3 mm.**

6. Messergebnisse mit dem Vektoriellen Network-Analyser VNWA3

Nach der korrekten SOLT-Kalibrierung wird eine S11-Messung im Bereich von 300....500 MHz programmiert und die Antenne an den Sendeport des Analysers angeschlossen. **Dabei darf man nicht vergessen, den Messpunkt um die Länge der Feedline (= 254 mm) und dem Verkürzungsfaktor von Teflon (= 0,0701) bis direkt an den Antenneneingang zu verschieben.** Das macht man mit der Option „**Port Extension**“ und die findet man unter „**Measure**“.



Das Messergebnis wird so oder so ähnlich aussehen – wir machen nämlich keine Freiraum-Messung, sondern halten das Gebilde ganz unter (beim SMA-Stecker) in der Hand. Das gibt natürlich unendlich viele Verformungen und Reflexionen und sonstige Störeinflüsse und die Kurve ändert dauernd ihre Form. Aber eines ist sicher: **Es ist nicht möglich, auf einen Eingangswiderstand von 50 Ohm zu kommen, denn die Theorie sagt für diesen Dipol etwa 71 Ohm voraus. Also können unsere Kurven nie genau durch den Diagramm-Mittelpunkt mit seinen R = 50 Ohm verlaufen, wenn nicht noch eine Anpass-Transformation dazugefügt wird!**

Andererseits beträgt der dadurch entstehende Reflektionsfaktor

r = (71 - 50) / (71 + 50) = 0,17

was **S11 = -15 dB** entspricht. Das hält man in den meisten Fällen aus....