



*Gunthard Kraus, DG 8 GB
und Hardy Lau, DL 1 GLH*

4NEC2-Simulation und Bau von Antennen für das 13-cm-Band (= 2300 MHz)

2,3 GHz-Gainblock-Empfänger zeigte im Probelauf am Messsender seine Qualitäten (siehe [1]). Da ging mir plötzlich durch den Kopf, dass die Sache mit einer kleinen Antenne am Messsender-Ausgang und einer identischen Antenne am

1. Vorgeschichte

Es war die Zeit vor der HAM-Radio 2017. Genauer gesagt blieben noch 14 Tage bis zu diesem Ereignis und das diesjährige Ausstellungsprojekt in Form eines 2,3 GHz-Gainblock-Empfängers zeigte im Probelauf am Messsender seine Qualitäten (siehe [1]). Da ging mir plötzlich durch den Kopf, dass die Sache mit einer kleinen Antenne am Messsender-Ausgang und einer identischen Antenne am Empfänger- Eingang wesentlich gewinnen und den Erfolg besser demonstrieren würde.

Jeder weiß, wie das weitergeht: Zuerst ein intensives Suchen in der Fachliteratur und besonders im Internet, gefolgt von

Grübeleien und Irrwegen durch unklare oder unvollständige Beschreibungen bzw. Inhalte.

Dann in Windeseile der Bau von 2 x 2 Antennen, die Bestimmung ihres Eingangsimpedanzverlaufs - und schon war der Messetermin da. Dass dort immer wieder der gleiche spontane Spruch „Wat haste denn da für 'nen Hubschrauber?“ von den Besuchern zu hören war, wundert beim Anblick von **Bild 1** nicht.

Doch während der Messe wuchs langsam immer mehr der Wunsch, die durch die Demonstrationen erahnten und gefühlten Eigenschaften der Antennen über eine NEC-Simulation zu bestätigen. Zum Glück stand Hardy Lau, DL1GLH (= Freund und Kollege in der Dualen Hochschule und langjähriger 4NEC2-Simulator) immer für Fragen und Anregungen und letzte Hilfe bei Problemen oder Brettern vor dem Kopf zur Verfügung. Deshalb vorab ein dickes Dankeschön, denn ohne ihn wäre der Artikel nicht möglich gewesen.

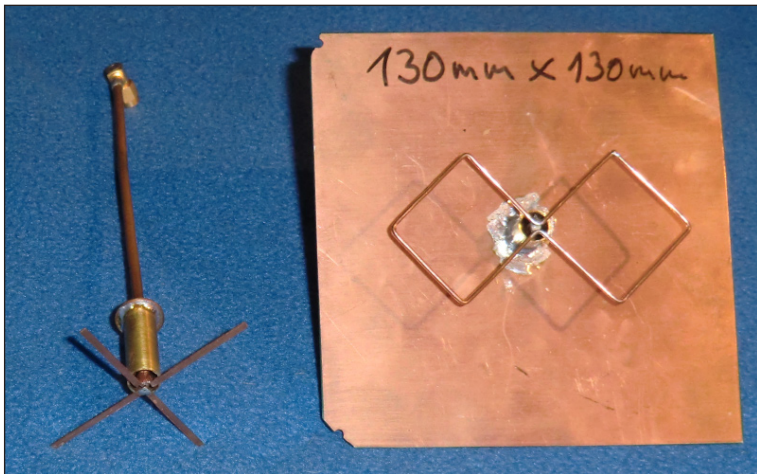


Bild 1:
Das sind der
„Hubschrauber“
und die Biquad

2. Richtiger Umgang mit 4NEC2

Erst wenn Einem ein Spezialist zeigt, wie viele Seiten NEC-Code aus dem Internet für eine bestimmte Antenne durch trickreiches Ausnützen der zur Verfügung stehenden NEC-Möglichkeiten plötzlich auf 6 Zeilen schrumpfen - da fängt man langsam Feuer. Deshalb beginnen wir mit einem scheinbar ganz einfachen Beispiel (= Lambda-Halbe Dipol für 2375 MHz) und steigern dann den Schwierigkeitsgrad. Das Entscheidende ist nämlich, dass man sich sofort die Tricks und Tipps aneignet, die selbst die Simulation großer Gebilde auf ein Minimum an geschriebenem Code reduzieren.

Außerdem gilt es, 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. Die Eigenschaften jedes Segments werden bestimmt und am Ende die Summe aller Segment-Ergebnisse ermittelt (= integriert).

Dabei darf man folgende Vorschriften nicht verletzen:

Die Länge jedes Segments muss kleiner als 5 % maximal 10 % der Wellenlänge sein.

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

Ist dieses Verhältnis größer als 8, reicht das normale Rechenprogramm mit dem Namen „Thin Wire Kernel“ aus. Es simuliert den Stromfluss im Draht als einen zentralen 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, was die Genauigkeit des Ergebnisses beträchtlich erhöht.

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, wenn nicht schon vorhanden, 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 [2].

2.1. Erstellen des NEC-Files für einen 2375 MHz-Dipol

Hier gibt es gleich mehrere Möglichkeiten. Aber dabei geht nichts über

den Notepad-Editor in Windows, mit dem sich bei zunehmender Erfahrung Änderungen und Erweiterungen am schnellsten einbringen und austesten lassen. Allerdings darf man nie vergessen, vor dem Abspeichern des fertigen Files bei Dateityp „Alle Dateien“ einzustellen und dem Dateinamen immer die Endung „*.NEC“ anzuhängen.

Aber Vorsicht:

NEC simuliert stets mit runden Drähten. Verwendet man dagegen wie bei meiner aufgebauten Antenne Kupferblechstreifen, müssen die Blechstreifen und der Draht im NEC-File den selben Umfang haben (...denn entlang der Oberfläche dieser Teile fließt der Strom und strahlt...).

Der 2 mm breite und 0,6 mm dicke Blechstreifen hat einen Umfang von $U = 2 \times 2 \text{ mm} + 2 \times 0,6 \text{ mm} = 5,2 \text{ mm}$. Das entspricht dem Umfang eines runden Drahtes mit einem Durchmesser von $(5,2 \text{ mm} / \pi) = 1,66 \text{ mm}$!

Außerdem sollte man sich angewöhnen, ALLE benützten Größen (Frequenz,

--- Listing 1:

CM	(= Comment = Kommentar)
'	= Mit dem Hochkomma leitet man bei Bedarf eine Kommentarzeile ein
CE	(= Comment End)
SY	(Smbols = nun folgt eine Sammlung an Deklaration von Variablen für die verschiedenen verwendeten Faktoren oder physikalischen Größen)
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)
LD	(= Load = damit können z. B. zusätzliche Bauteile wie R, L, C bei bestimmten Segmenten eingebaut werden)
FR	(= Frequency = Angabe der Frequenz oder des gesweepen Bereichs)
EK	(= Extended Kernel = Programmzusatz zur korrekten Simulation von dünnen Drähten)
EX	(= Excitation = Anregung der Struktur durch Zufuhr von Energie)
EN	(= End = File Ende)

Drahtradius, Drahtlängen usw.) zu Beginn als VARIABLE zu deklarieren. So kann man blitzschnell auf andere Frequenzen oder Abmessungen umstellen. Und nur so kann man (als Fortgeschrittener...) später vom Programm automatische Optimierungen vornehmen lassen.

Es folgt nun der Aufbau eines „Standard-NEC-Files“. Dabei handelt es 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 (**Listing 1**).

Die Details sollen nun anhand des NEC-Files des $\lambda/2$ -Dipols genauer betrachtet

--- **Listing 2:**

```
CM Lambda - Halbe Dipol      = Kommentar
CE                            = Kommentarende
/
SY freq=2375                  = Es soll bei der Frequenz f = 2375 MHz gearbeitet werden
SY dipolarm=300/freq/4        = Jeder Dipolarm hat die Länge „Lambda-Viertel“
                               bei 2375 MHz
SY dr=0.00166/2              = Der Radius des Antennendrahtes beträgt 0,83 mm
/
GW 1 9 0 -dipolarm 0 0 dipolarm 0 dr = Nun muss man 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 zu untersuchenden
                               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 Breite des Frequenzschrittes
/
EK                             = Extended Kernel = Zusatzprogramm für dünne Dräht 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
```

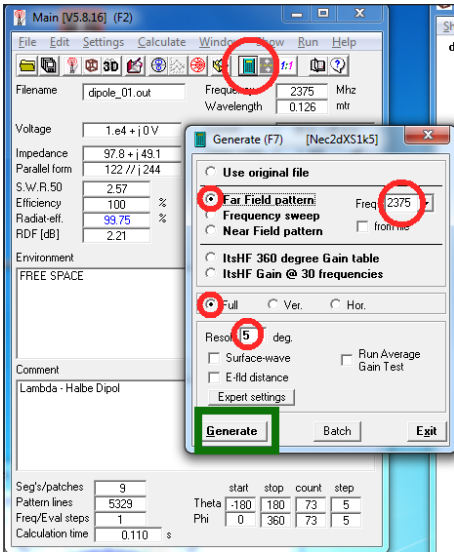


Bild 2: So wird die Fernfeld-Simulation gestartet

2.2. Fernfeld-Simulation und Optimierung der Dipol-Eigenschaften

Dazu klickt man (siehe **Bild 2**) auf das Symbol des Taschenrechners, wählt „Farfield“ und prüft die Einstellungen:
 Frequenz = 2375 MHz
 Full
 Resolution = 5 degrees

Ein Klick auf „Generate“ startet die Berechnung und Ausgabe der gewünschten Richtdiagramme. Man sollte sich aber gleich selbst eine Freude machen und die Taste „F9“ drücken. Damit erscheint eine 3D-Darstellung der Antennenstruktur (...vorausgesetzt, man hat „DirectX“ auf dem Rechner installiert sowie eine Rechnerhardware, die damit umgehen kann ... eigene bittere Erfahrung mit einem älteren Notebook).

werden.

Bitte beachten:

Alle Längen- oder Durchmesserangaben erfolgen **IMMER** in der Maßeinheit „Meter“!

Und alles in schwarzer Schrift stellt das NEC-File dar. Rot geschrieben sind die Erklärungen - sie sind nur hier im Artikel erlaubt!

Zwischen den einzelnen Karten kann man vorsorglich leere Kommentarzeilen (durch ein Hochkomma) vorsehen (**Listing 2**).

Hat man dieses NEC-File fertiggestellt und gespeichert, braucht man nur noch die Software 4NEC2 zu starten und über „File“ und „Open 4NEC2 in/out file“ für den Aufruf des eben erstellten Files zu sorgen.

Eine farbenfrohe Darstellung des Dipols zeigt **Bild 3**. Er kann durch „Ziehen mit der Maus“ gedreht und herumgeschwenkt werden und seine Größe lässt sich über die „Zoom“-Tasten verändern. Im rot markierten Untermenü mit der Angabe „hide pattern“ findet man „Multi-color“ und bekommt nach dem Anklicken **Bild 4** auf den Schirm. Hier kann man sich mit den „Zoom“-Tasten eine passende Größe des Strahlungsdiagramms einstellen und die Codierung der Gewinnwerte in „dBi“ durch die links angeordnete Farbskala genießen.

Allerdings ist dazu eine ganz wichtige Bemerkung nötig:

Bei Bild 3 war rechts unten ein Häkchen bei „ARRL“ gesetzt. Dabei wird mit einer komplett anderen logarithmischen Skala gear-

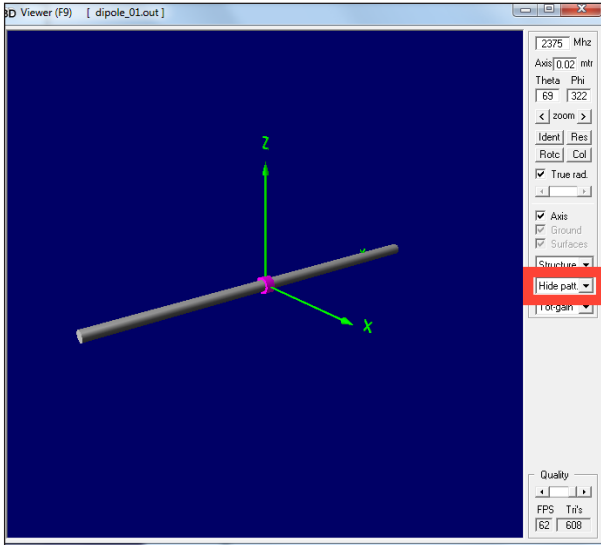


Bild 3: Diese 3D-Darstellung des Dipols ist einfach ein hübscher Anblick; zum markierten Kästchen „ARRL“: siehe Text

beitet, wodurch der Bereich von +2,11 dBi bis etwa -6,5 dBi starkgedehnt dargestellt wird, während es ab -6,5 dBi mit einem Ruck gleich zu -21 dBi hinuntergeht. Das 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.

Entfernt man das Häkchen bei „ARRL“, wird sofort der Unterschied sichtbar: Man erhält eine korrekte farbige dBi-Teilung (für die Basis 10) (Bild 5) und die Dehnung in der Nähe des Maximums ist verschwunden. Hier kann

jeder selbst entscheiden, was praktischer ist...

Um den Verlauf der Eingangsimpedanz zu sehen, wählt man wieder die „Taschenrechner-Taste“ in der Menüleiste und schaltet auf „Frequency sweep“ um. Natürlich darf man nicht vergessen, den Sweep-Bereich und die Schrittweite anzugeben (Bild 6).

Gewählt wurde ein Bereich von 2300 bis 2500 MHz mit einer Schrittweite von 5 MHz, die übrigen Grundeinstellungen (z.B. Winkelauflösung = 5 Grad) bleiben unverändert. Die Berechnung dauert nun

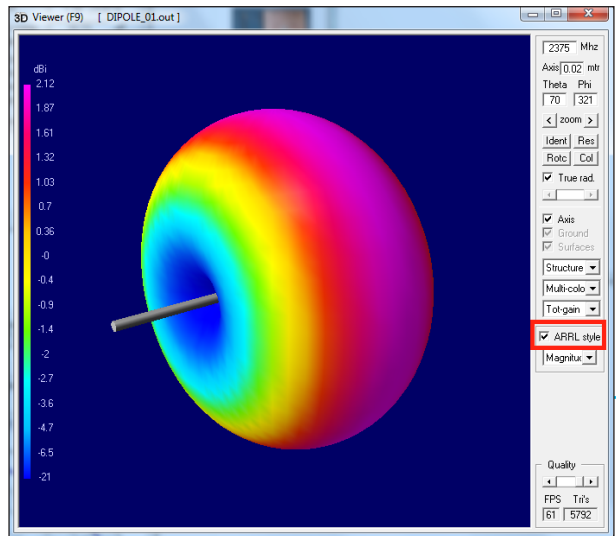


Bild 4: Bei der „ARRL“-Version lässt sich die Umgebung des Maximums besonders gut untersuchen

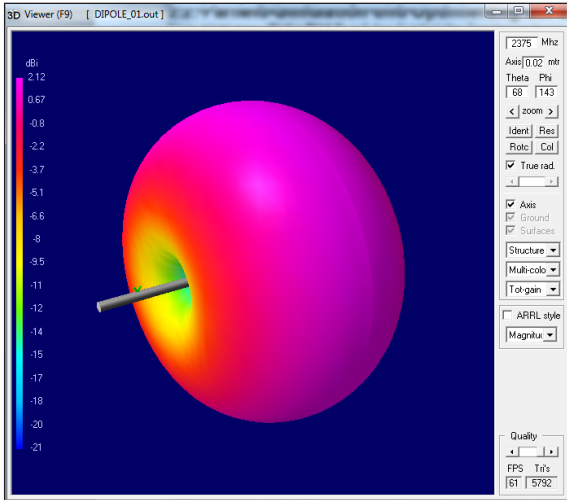


Bild 5: Die „lineare dB-Teilung“ vermittelt dagegen einen Gesamtüberblick bis hin zum Minimum

Zuerst ruft man die Einstellungen (Settings = roter Rahmen) auf und wählt darin den „Notepad-Editor“ (= erste Option).

Ein Klick auf den „Editor-Button“ (= grüner Kreis) öffnet das benutzte NEC-Input-File. Darin wird der Korrekturfaktor als zusätzliches Symbol „x“ eingefügt. Die y-Koordinaten der beiden verwendeten „Wires“ werden zusätzlich mit diesem Faktor multipliziert (**Bild 10**). So kann dieses NEC-File leicht auf beliebige andere Frequenzen umgestellt werden.

ein wenig länger und man kann für die Darstellung des Ergebnisses unter SWR, Reflektionsfaktor, Gain oder Impedance auswählen.

Bei näherer Betrachtung des ermittelten Eingangsimpedanzverlaufs in **Bild 7** erkennt man, dass die Antenne eine gehörige „Open End Extension“ wie jede am Ende offene Microstrip-Leitung aufweist und deshalb „kapazitiv verkürzt“ ist. Eine Wiederholung des Sweeps für 2100 bis 2200 MHz zeigt, dass dadurch die Resonanzfrequenz bis auf 2173 MHz abgesunken ist (**Bild 8**)!

Zur Korrektur sieht man einen Verkürzungsfaktor „x“ als neues Symbol für die Dipol-Armlängen im NEC-File vor und spielt etwas mit seinem Wert. Mit $x = 0,912$ erhält man somit genau die gewünschte Resonanzfrequenz von 2375 MHz.

Und das geht so (siehe **Bild 9**):

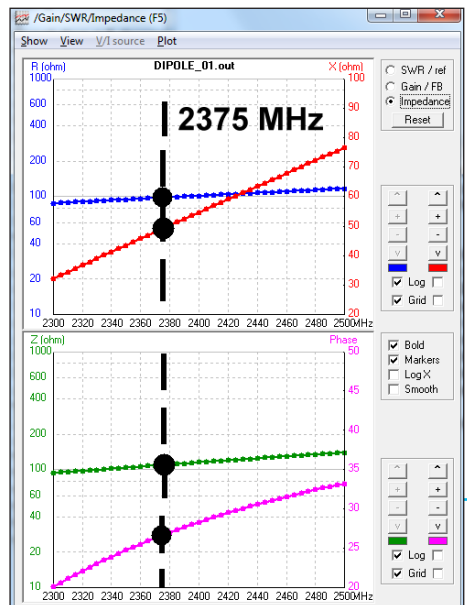


Bild 6: Diese Einstellungen sind vor dem Start des „Frequency Sweeps“ vorzunehmen

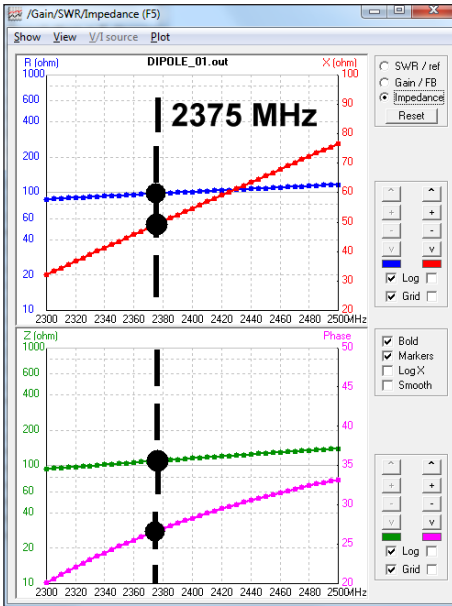


Bild 7: Man sieht es am Blindanteil bei 2375 MHz, dass die Antennenstäbe zu lang sind!

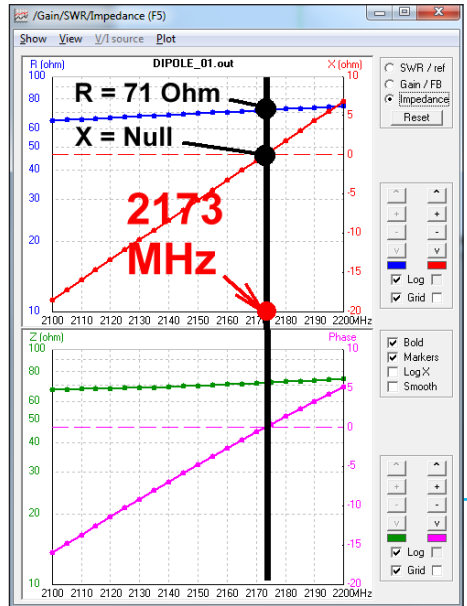


Bild 8: Beim genauen Nachsehen findet man die Resonanz bei 2173 MHz

Ganz wichtig:

Nach dieser Änderung öffnet man das Datei-Menü in der linken oberen Ecke des Editors und wählt „Speichern“. Dadurch schließt sich das Menü wieder. Aber man muss es nochmals öffnen und darin auf

„Beenden“ klicken.

Wer das nicht so macht, handelt sich ungeahnten Ärger ein! Ohne „Beenden“ werden die Ergebnisse der vorherigen Aktion im „Output-File“ nicht gelöscht, sondern die Simulationsergebnisse un-

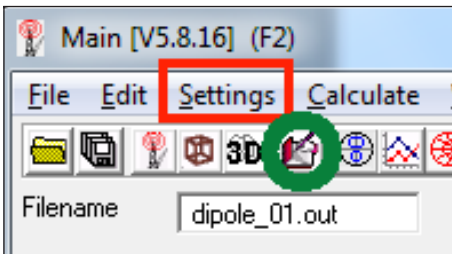


Bild 9: So beginnt die Korrektur: Erst unter „Settings“ den Notepad-Editor wählen, dann auf den grünen „Edit“-Button klicken

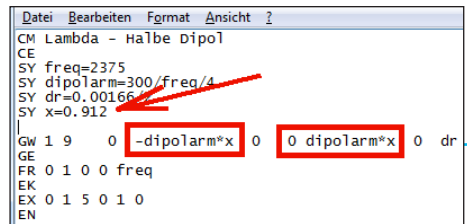


Bild 10: Bei den Symbolen kommt der Korrekturfaktor „x“ dazu; mit ihm werden die Dipol-Längen multipliziert

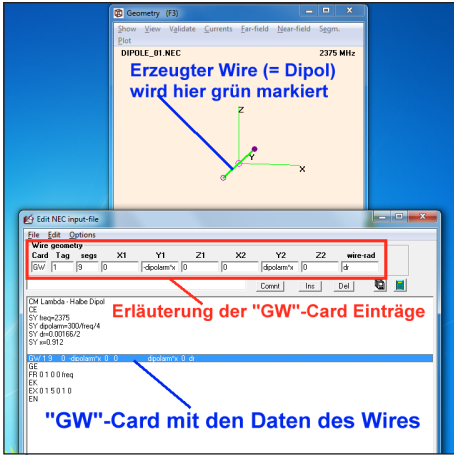


Bild 11: Die zweite Möglichkeit ist der „NEC-Editor“. Hier sieht man zusätzlich die Geometrie, zusammen mit einer kleinen Übersicht des aktivierten Tags

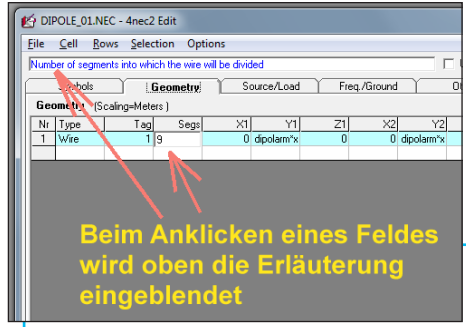


Bild 12: Manche Leute arbeiten auch gerne mit der vierten Option, nämlich der Tabledarstellung des „NEC-Editors (new)“

serer Änderung einfach dazu geschrieben. Das gibt unglaubliche Probleme (== eigene Erlebnisse mit etlichen Stunden Fehlersuche...!)

Hinweis:

Es gibt unter „Settings“ von 4NEC2 noch drei weitere Editor-Optionen. Die sollte man sich gelegentlich mal ansehen.

In manchen Fällen ist es nämlich von Vorteil, die zweite Möglichkeit, nämlich „NEC Editor“ zu wählen. Sie präsentiert das NEC-File in derselben Form wie „Notepad“, liefert aber sämtliche Details einer angeklickten Zeile (Card / Tag / Segment / Koordinaten usw.) in Form einer zusätzlichen Übersicht. Nun muss man nicht mehr im NEC-Handbuch nachsehen, was ein bestimmter Wert gerade bedeutet... und das betreffende Teil wird in der Geometrie-Darstellung extra grün markiert (**Bild11**).

Auch die vierte Editorversion „NEC Editor (new)“ ist oft sehr hilfreich. Hier wird alles in Tabellenform (ähnlich wie bei Excel) dargestellt, die eingetragenen Werte können leicht geändert und neue „Tags“ hinzugefügt werden (**Bild 12**).

Die dritte Möglichkeit („Geometry Editor“, Tasten <Ctrl> + <F3>) öffnet eine räumliche Darstellung des untersuchten Objek-

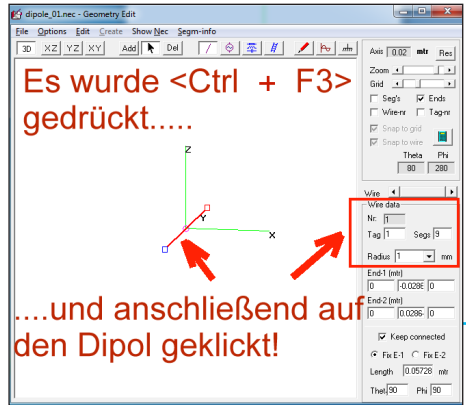


Bild 13: Wer sich dagegen direkt an der Geometrie orientieren möchte, drückt entweder <F3> oder <Ctrl + F3> (siehe Text)

tes und beim Anklicken eines „Wires“ der Antenne eine unglaubliche Menge an Details (**Bild 13**).

Falls das zuviele Details sind, kann man auch nur <F3> drücken. Dadurch öffnet sich die Darstellung „Geometry“ mit dem Dipol. Hier kann man unter „Show“ die „Wire“- oder „Tag-Nummern“ oder die einzelnen Segmente einblenden lassen.

In den meisten Fällen ist das ausreichend und wesentlich übersichtlicher, das sollte man sich merken.

3. Simulation einer Übertragungsstrecke

3.1. Eine zweite Antenne muss her

Mit NEC lassen sich auch Simulationen im Fernfeld durchführen, was

man nützen kann, um z.B. später die genauen Eigenschaften dieser zirkular polarisierten Antenne zu untersuchen. Man ordnet dabei einfach eine zweite identische Antenne (oder einen „Messdipol“) in ausreichendem Abstand an, dreht und wendet diese nach Geschmack und ermittelt jedes Mal den fließenden Strom in ihrem 50Ω -Abschlusswiderstand.

Addieren wir also in unserem NEC-File „dipole_01.nec“ einen identischen Dipol (durch Kopieren der Originalantenne) in $x = 2$ Meter Abstand. Das entspricht 16 Wellenlängen und somit einen sicheren Betrieb im Fernfeld. Außerdem bringt man in der Mitte dieses Empfangsdipols einen Widerstand mit 50Ω an. Das neue NEC-File erhält folgende Form (**Listing 3**).

Schauen wir uns die erste rote Zeile genauer an, denn sie erzeugt die zweite Antenne (**Listing 4**):

Und mit der zweiten roten Zeile fügt man

```
--- Listing 3:
CM Lambda - Halbe Dipol
CE
,
SY freq=2375
SY dipolarm=300/freq/4
SY dr=0.00166/2
SY x=0.912
GW 1 9 0 -dipolarm*x 0 0dipolarm*x 0 dr
GM 10 1 0 0 0 2 0 0 1
,
GE
,
LD 0 11 5 5 50
FR 0 1 0 0 freq
,
EK
,
EX 0 1 5 0 1 0
,
EN
```



--- Listing 4:

- GM = Geometry move = damit wird eine Kopie erzeugt
- 10 = Inkrementiere die Tag-Nummer gegenüber Start-Tag 1 um 10 Schritte
- 1 = wir wollen nur eine Kopie
- 0 0 0 = keine Rotation um irgend eine Achse vorsehen
- 2 0 0 = verschiebe die Kopie um 2 Meter in X-Richtung
- 1 = beginne den Kopiervorgang ab tag 1 (= ursprüngliche Antenne)

--- Listing 5:

- LD = Load card. Damit können wir z. B. Bauteile hinzu fügen
- 0 = wir wollen 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 Segment 5 (= Drahtmitte)
- 50 = eingefügt wird ein Ohmscher Widerstand mit 50 Ω. L und C würden folgen, haben aber beide den Wert Null

in der Mitte der neuen Empfangsantenne einen Lastwiderstand mit 50 Ω ein (**Listing 5**):

Zum Abschluss geht man in „Settings“ im Hauptmenü und öffnet „Input Power“. Dort schreibt man eine Sendeleistung von 1 Megawatt (= 1000000 = 1e6) vor, damit sich auch in größeren Entfernungen noch etwas rührt.

3.2. Das Ergebnis der Fernfeld-Simulation

Die Simulation erfolgt exakt nach der Prozedur in Kapitel 2.2 - auch die 3D-Darstellung über die Taste „F9“ braucht man nun dringend.

Wenn darin „hide pattern“ aktiv ist und man gefühlvoll zoomt, erhält man **Bild 14**. Darin sieht man die Sendeanenne mit einer violetten Bauchbinde, diese kennzeichnet die Einspeisung. Bei der Empfangsantenne sitzt dagegen ein hellblauer Würfel auf dem mittleren Segment - er stellt die „Load“, also den eingefügten Lastwiderstand mit 50 Ω, dar.

Hier interessiert die Empfangsleistung im 50 Ω-Widerstand und deshalb klickt man doppelt auf die Taste „Ident“. Man gibt das gewünschte Segment ein, das die Nummer „14“ trägt. Das ist einfach zu verstehen, da alle vorkommenden Segmente der Reihe nach aufgelistet werden und jede Antenne aus 9 Segmenten besteht. Also findet man die Mitte der Empfangsantenne bei „9 + 5 = 14“.

Das Ergebnis ist in **Bild 15** dargestellt;

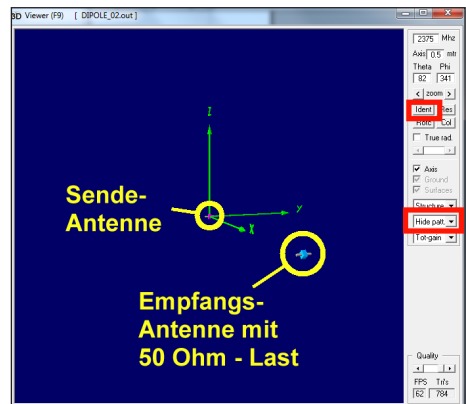


Bild 14: So sieht die Anordnung aus, wenn eine Messantenne dazu kommt

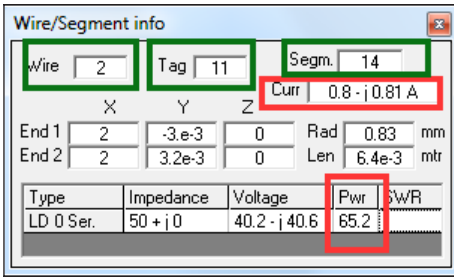


Bild 15: Das muss man natürlich erst einmal heraus finden: In Tag 11 / Segment 14 sitzt der Lastwiderstand der Empfangsantenne; dann erst erhält man den fließenden Strom und die empfangene Leistung (siehe Text)

darin findet man neben allen übrigen Daten eine Empfangsleistung von 65,2 Watt sowie einen Strom von $0,8 - j0,81$ A.

Nun sollte man prüfen, ob man sich wirklich im Fernfeld befindet und ob 4NEC2 die Verhältnisse korrekt berechnet. Dazu wiederholt man die Simulation mehrmals und verdoppelt jeweils den Abstand der beiden Antennen (also 4 m / 8 m / 16 m usw. bei X eintragen). Das geht sehr einfach, denn man braucht lediglich im Editor mit dem geöffneten NEC-File in dieser Zeile die rot gekennzeichnete Eingabe der X-Verschiebung zu ändern, zu speichern, nochmals zu öffnen und zu beenden, dann simulieren und schließlich die Leistung in Segment 14 anzusehen:

GM 10 1 0 0 0 2 0 0 1

Die Ergebnisse lauten:

- für 2 m: P = 65,2 W
- für 4 m: P = 16,3 W
- für 8 m: P = 4,08 W
- für 16 m: P = 1,02 W

Man sieht, dass die Feldstärken und damit

die Empfangsleistungen mit steigendem Abstand quadratisch abnehmen (denn die Feldstärke und damit die Spannung bzw. der Strom nehmen linear ab). 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 nimmt eine entsprechende Rotation um die X-Achse bei der GM-Karte vor:

GM 10 1 90 0 0 2 0 0 1

Die Simulation bestätigt das anschließend sehr schön (**Bild 16**).

Hinweis:

Zur Vorschrift „Messung nur im Fernfeld“ sollte man sich zusätzlich **Bild 17** ansehen. Dazu wurde der Abstand der Emp-

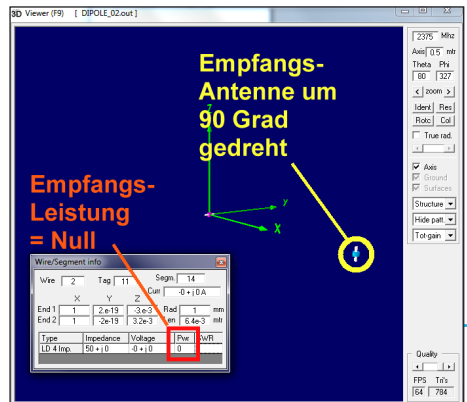


Bild 16: Eindeutige Horizontal-Polarisation: Beim Kippen der Messantenne um 90 Grad ist die Leistung weg

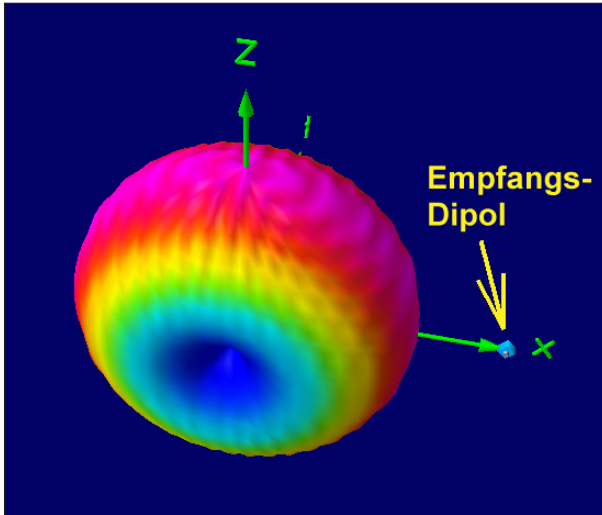


Bild 17: Wer hätte das gewusst? Erst die Simulation zeigt die „Kräuselung“ des Richtdiagramms der Sendeantenne, wenn eine weitere Antenne ins Spiel kommt

sich als Blickfang für die Empfänger-Präsentation auf der HAM-Radio an. Die Idealform dieses Gebildes zeigt **Bild 18** (= zirkular polarisierter Kreuzdipol mit zwei ungleich langen Dipolen samt Symmetrierung), aber verblüffend ist wirklich **Bild 19**: Dieses in aller Eile von Paul Wade handgestrickte „Vehikel“ weist tatsächlich bei 1296 MHz weniger als $S11 = -20$ dB auf!

Das sollte doch auch bei 2375 MHz gut funktionieren, vor allem dann, wenn man etwas mehr Sorgfalt und Überlegung in die mechanische Ausführung steckt.

fangsantenne zum Sendedipol von 2 m (= 16 Wellenlängen) auf 1 m (= 8 Wellenlängen) vermindert und man sieht, dass die zweite Antenne deutliche Rückwirkungen verursacht. Dadurch entsteht eine „Kräuselung“ im Richtdiagramm des Sendedipols. Bei 2 m Abstand ist das schon leidlich erträglich, aber so richtig gut wird das erst bei deutlich größeren Abständen.

4. Die „Hubschrauber-Antenne“ = Zirkular polarisierter Kreuzdipol

4.1. Die Ausgangsbasis

Sie fand sich im Internet-Artikel von Paul Wade, W1GHZ [3] und bot

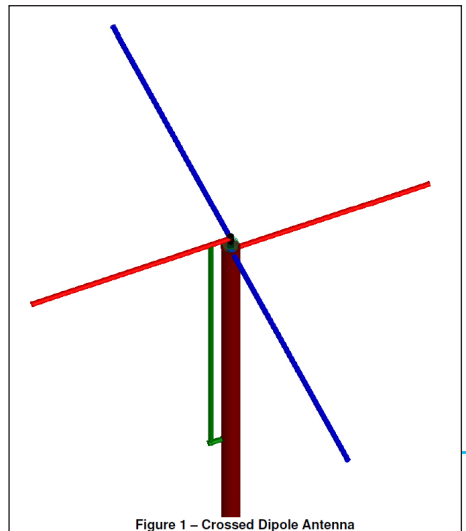


Bild 18: So sieht der korrekt symmetrierte und zirkular polarisierte Kreuzdipol in der Theorie aus...

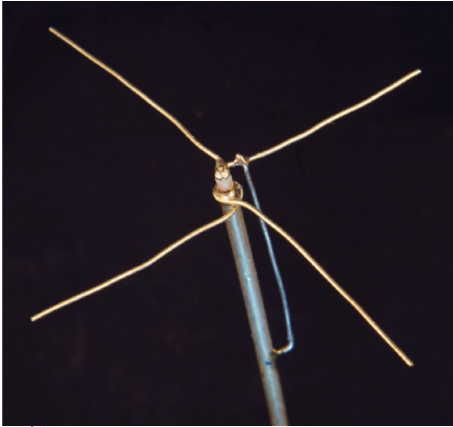


Bild 19: ...und das hat Paul Wade, W1GHZ in aller Eile draus gemacht

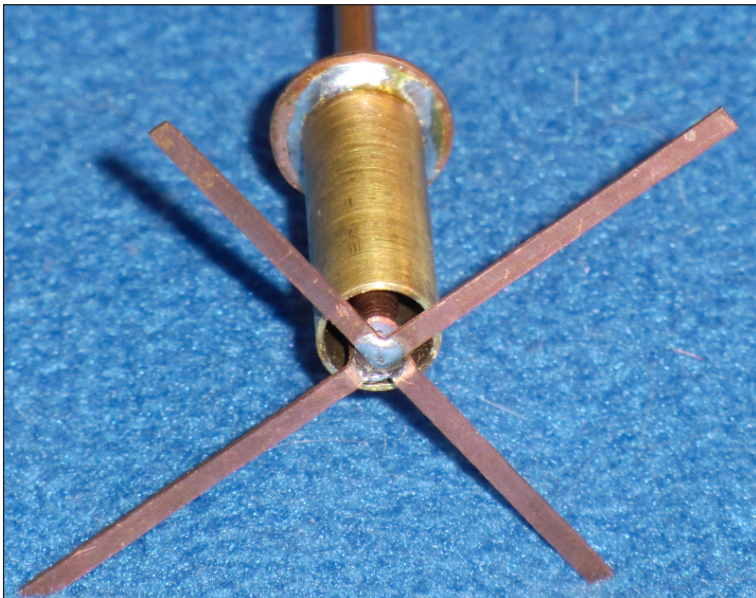
4.2. Theorie und Praxis

Im Prinzip besteht diese Antenne aus zwei parallel geschalteten Dipolen,

die gegeneinander um 90 Grad verdreht sind. Ein weiterer Trick ist nun, dass ein Dipol für die vorgesehene Mittenfrequenz von 2375 MHz zu lang, der andere dagegen zu kurz ist ($L = 0,42 \cdot \lambda$ bzw. $L = 0,527 \cdot \lambda$ laut Artikel). Deshalb weist der kürzere Dipol induktives, der längere dagegen kapazitives Verhalten auf. Bei $f = 2375$ MHz und in der nahen Umgebung dieser Mittenfrequenz beobachtet man aus diesem Grund einen Phasenunterschied von ca. 90 Grad zwischen den beiden Dipolströmen. Zusammen mit dem räumlichen 90 Grad-Versatz wird das Ganze zur zirkular polarisierten Sendeanenne.

Aber aufpassen:

Diese Zirkularstrahlung findet man nur in senkrechter Richtung, also „nach oben“ und „nach unten“ = beim direkten Blick auf den „Propeller“. In waagerechter Rich-



*Bild 20:
Viel Arbeit,
aber nahe
am Ideal:
So sieht das
aufgebaute
Muster für
2375 MHz aus*



tung findet man nur eine horizontal polarisierte Abstrahlung.

Die Details der praktischen Umsetzung zeigt **Bild 20**. Darin ist gut zu erkennen, dass die runden Dipolstäbe einfach durch Kupferblechstreifen mit 0,6 mm Dicke ersetzt sind. Sie wurden als Winkel mit der Laubsäge aus Kupferblech vom Flaschner herausgesägt. Jeder „Streifen“, der einen Dipolarm bildet, ist 2 mm breit und die Länge der einzelnen Arme liegt nach obigen Richtwerten bei 26,4 mm bzw. 33,4 mm.

Nochmals zur Erinnerung:
 NEC simuliert stets mit runden Drähten. Verwendet man dagegen, wie hier, Kupferblechstreifen, müssen die Blechstreifen und der Draht im NEC-File denselben Umfang haben (... denn entlang der Oberfläche findet man den Strom ...).

Der Blechstreifen hat einen Umfang von $U = 2 \times 2 \text{ mm} + 2 \times 0,6 \text{ mm} = 5,2 \text{ mm}$. Das entspricht dem Umfang eines runden Drahtes mit einem Durchmesser von $(5,2 \text{ mm} / \pi) = 1,66 \text{ mm}$. Und genau damit wurde bereits der einfache Dipol im vorigen Kapitel simuliert...

Die Symmetrierung erfolgt durch einen am Ende kurzgeschlossenen „ $\lambda/4$ -Topf“, der mit dem Kupfer-Außenmantel des als Zuleitung dienenden Semi-Rigid-Kabels verlötet ist. Mit einem Außendurchmesser des Kabelmantels von ca. 3,5 mm und dem Innendurchmesser von 8,2 mm eines 10 mm-Messingröhrchens aus dem Baumarkt sowie Luft als Dielektrikum erhält man ziemlich genau einen Wellenwiderstand von 50Ω . Solch ein Topf wird am unteren Ende durch eine aufgelötete Scheibe kurzgeschlossen.

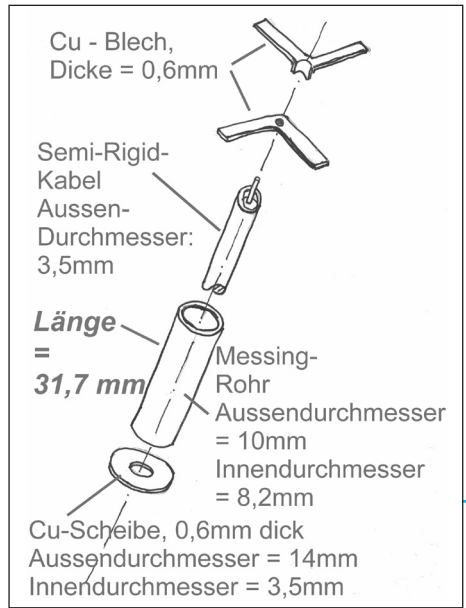
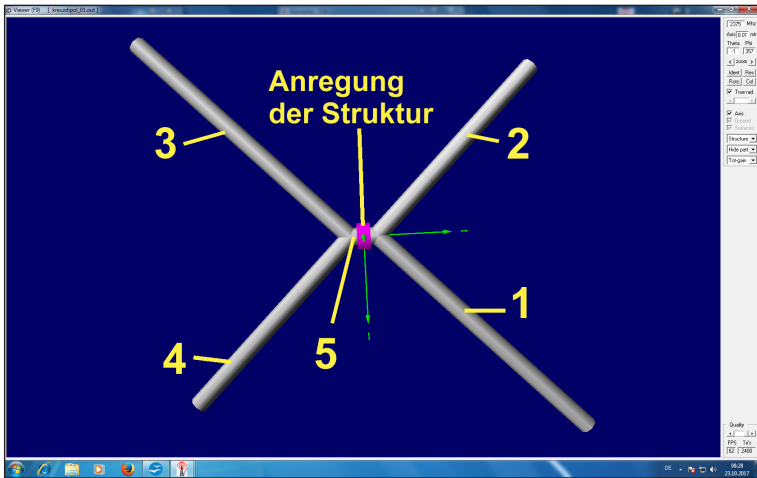


Bild 21: Hier sieht man alle Details der praktischen Umsetzung (... siehe Text)

Der Wellenwiderstand dieses Topfes selbst spielt keine große Rolle, denn es soll ja nur der Kurzschluss am unteren Röhrchen-Ende in einen Leerlauf am Anfang transformiert werden und so wird der Dipol symmetrisch betrieben. Aber die mechanische Länge des Röhrchens muss genau stimmen und liegt für 2375 MHz bzw. eine elektrische Länge von $\lambda/4$ bei 31,7 mm.

Wie das Ganze nun im Detail aussieht, zeigt die Skizze in **Bild 21**. Ein kleiner Trick dabei ist, dass das Semi-Rigid-Kabel am Eingang unter einem Winkel von 45 Grad abgemantelt und dort die Innenisolation teilweise entfernt ist. So kann der eine Blechwinkel, der mit einer Bohrung von 0,9 mm versehen wurde, direkt auf den nun hochstehenden, freien Innenlei-



*Bild 22:
So wird der
zirkulare
Kreuzdipol für
die Simulation
vorbereitet
(siehe Text)*

ter aufgelötet werden, während der zweite Winkel sorgfältig zurechtgebogen auf der anderen Seite des hochstehenden kupfernen Kabelmantels aufgelötet wird.

Die letzte praktische Info:

Das andere Ende der ca. 15 cm langen Semi-Rigid-Zuleitung trägt einen abgewinkelten SMA-Stecker zur Speisung.

4.3. 4NEC2-Simulation der Hubschrauber-Antenne

4.3.1. Erstellen des NEC-Files

Das soll wieder mit dem „Notepad“ erfolgen, wobei es wichtig ist folgende Dinge vorher festzulegen:

a. Die Antennenstruktur ist waagrecht in der XY-Ebene angeordnet ($Z = 0$).

b. Die Blechstreifen der Dipolararme werden in der Simulation durch runde Stäbe mit 1,66 mm Durchmesser ersetzt.

c. Zuerst kommen die beiden unterschiedlichen Dipolararme (siehe **Bild 22**, Teil „1“ und „2“) dran. Die Arme werden verbunden und in 9 bzw. 11 Segmente aufgeteilt.

d. Dann wird diese Anordnung kopiert und dabei um 180 Grad gedreht (ergibt Teil „3“ und „4“).

e. Mit Wire „5“ verbindet man die beiden Kreuzdipol-Hälften.

f. Und mitten in Teil „5“ ordnet man die speisende Spannungsquelle an.

Damit kann man das NEC-File in folgender Form schreiben (**Listing 6**):

4.3.2. Simulation und Messung von S11

Das mit diesem NEC-File simulierte Fernfeld (Sendeleistung = 1 Mega-



watt) und seine räumliche Darstellung (von oben gesehen) zeigt **Bild 23** in der „ARRL-Darstellung“. Wegen der dadurch gedehnten dB-Teilung in der Nähe des Maximums ist gut zu erkennen, dass die äußere Form des Diagramms kein Quadrat bildet, sondern ungefähr zu einem Parallelogramm verformt ist. Folglich strahlt bei 2375 MHz ein Dipol (= der längere) stärker als der andere, was bedeutet, dass die Resonanzfrequenz noch zu tief liegt. Das ist ja auch kein Wunder - denn

die „Open End Extension“ wurde noch nicht berücksichtigt. Deshalb wiederholt man die Simulation einige Male mit kleineren Werten für den Verkürzungsfaktor „x“. Das geht schnell und mit dem Wert „x = 0,975“ ist man schon am Ziel, denn aus **Bild 24** kann man folgende Details entnehmen:

- a. Der Querschnitt des Diagramms ist nun etwa quadratisch.
- b. Das (rot eingefärbte) Strahlungsma-

--- Listing 6:

```

CM Zirkular polarisierter Kreuzdipol für 2375MHz           Es folgen Kommentare
'
' Frequenz = 2375 MHz / Wellenlänge = 126,3 mm
' Verkürzungsfaktoren bei den Längen der einzelnen Dipolarme:
' 0,42 bzw. 0,527 der halben Wellenlänge laut Internet
' 9 bzw. 11 Segmente bei den Dipolarmen vorsehen
' Speisendes Segment (GW 10) hat 3 mm Länge
' Antennendraht hat 1,66 mm Durchmesser; das ergibt eine Drahradius "ds" 0,83 mm
CE                                                         Kommentar Ende
'
SY freq=2375                                               Definition der Symbole
' Arbeitsfrequenz =2375 MHz
SY dips=300/freq/2*0.42
' Kurzer Dipolarm
SY dipl=300/freq/2*0.527
' langer Dipolarm
SY dr=0.00166/2
' Drahradius = 0,83 mm
SY x=1
' vorgesehener Verkürzungsfaktor „x“ für Antennenlänge, Start mit x = 1
'
GW 1   9   0   0.0015  0  -dips*sin(45)*x  dips*sin(45)*x+0.0015  0  dr „1“
                                                                in Bild 22
GW 2  11   0   0.0015  0  dipl*sin(45)*x  dipl*sin(45)*x+0.0015  0  dr „2“
                                                                in Bild 22
GM 5   1   0   0       180  0       0       0       1
                                                                Kopieren und Drehen gibt 3 und 4
GW 10  1   0  -0.0015  0   0       0.0015  0       ds
                                                                Speisesegment 5 wird erstellt (Tag 10 mit einem Segment)
GE
'
FR 0 1 0 0 freq      Betrieb bei 2375 MHz
EK                    Extended Thin Wire Kernel aufrufen
EX 0 10 1 0 1 0      Anregung mit realem Signal (1 Volt) im Speisesegment
                                                                (= Tag 10 / Segment 1)
EN
    
```

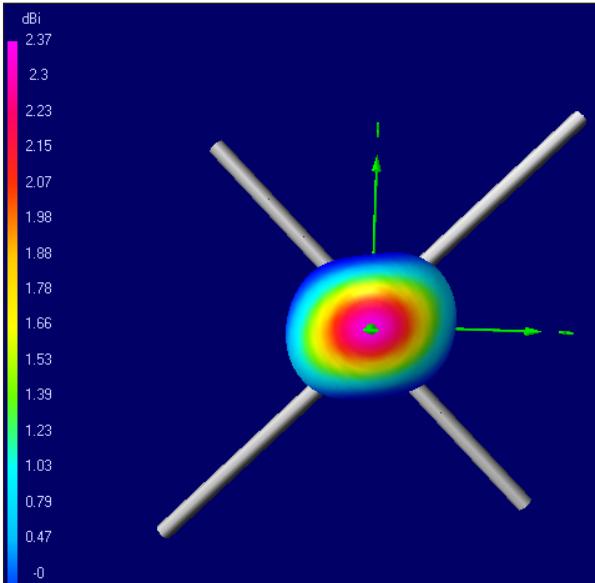


Bild 23: Das Ergebnis der ersten Fernfeld-Simulation (von oben) wirkt noch etwas platt gedrückt

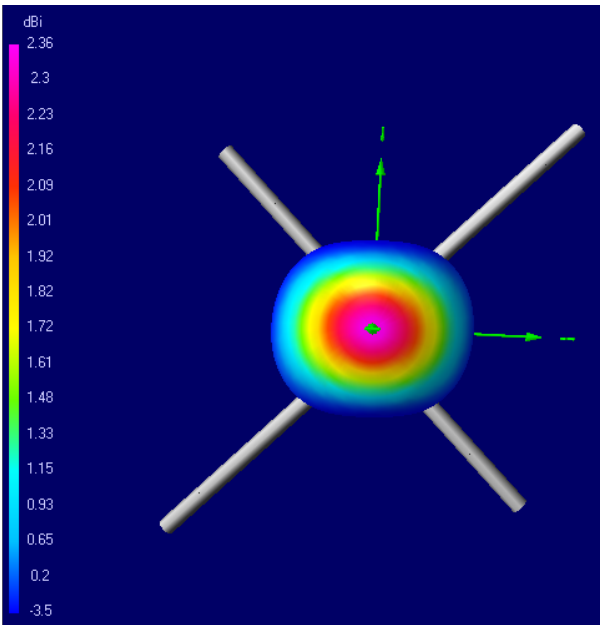


Bild 24: So sollte es aussehen! (siehe Text)

ximum in der Mitte bildet eine kleine Ellipse und deren Achse verläuft genau in Richtung der Diagonale zwischen den beiden Dipolachsen.

c. Die vier blau gefärbten Strahlungs-Minima für die horizontale Abstrahlung an den vier Seiten des Quadrates sind nun etwa identisch.

d. Der maximale Antennengewinn von ca. 2,37 dBi bleibt durch die Änderung praktisch unverändert.

Also muss man die mechanischen Längen der 4 Dipolarme jeweils um den Faktor 0,975 verkürzen, was $26,4 \text{ mm} \times 0,975 = 25,74 \text{ mm}$ bzw. $34,4 \text{ mm} \times 0,975 = 33,54 \text{ mm}$ ergibt. In der Praxis war das eine „Popelarbeit“, die an der fertigen Antenne nur noch behutsam mit einem „Dremel“ und einem feinen Diamant-Schleifkörper zu bewerkstelligen war.

Die Ergebnisse der Mühen sind interessant: **Bild 25** zeigt den mit dem Netzwerk-Analysator (hp8410) gemessenen Verlauf von S11, **Bild 26** dagegen die Simulation von 2300 bis 2450 MHz. Die Simulation sagt dabei für 2375 MHz einen S11-Wert von -15 dB voraus, wobei die Messergebnis so-



Bild 25: Auch der Netzwerk-Analysator ist mit dem Ergebnis der Mühe sehr zufrieden....

gar besser sind, was selten ist.

Eine Sache ist noch wichtig:

Wenn man das Häkchen bei „ARRL“ entfernt und dadurch auf „lineare dB-Teilung“ umstellt, findet man bei der horizontal polarisierten „Linearstrahlung“ plötzlich zwei Minima - genau in der XY-Ebene und in Richtung der Y-Achse; **Bild 27** zeigt das sehr schön.

4.3.3. Die Sache mit der Polarisation

a. Die Zirkularpolarisation in Z-Richtung

Dazu greift man auf Kapitel 3 zurück, in welchem die Fernfeld-Simulation für einen einfachen Dipol vorgenommen wurde. Allerdings erzeugt man nun eine

Kopie des „Hubschraubers“ als Empfangsantenne und ordnet sie nach oben in Z-Richtung im Abstand von 4 m (= garantiert im Fernfeld) an, erhöht aber in der Karteikarte „Settings“ die Sendeleistung auf 2 Megawatt. Nun benötigt man im NEC-File genau vor der „GE“-Karte (= Geometry End) wieder einen zusätzlichen GM-Befehl (= Geometry Move) für die „Empfangsantenne“, der so aussieht:

```
GM 100 1 0 0 0 0 0 4 1
```

Die Zahlen bedeuten der Reihe nach:

100 Die neue Antenne

heißt nun „tag = 100“

- 1 Erzeuge eine einzige Kopie
- 0 0 0 Keine Rotation
- 0 0 4 Schiebe die Kopie um vier Meter nach oben in Z-Richtung
- 1 Beginne den Kopiervorgang beim ersten Draht („der hat „Tag = 1““)

Jetzt ergänzt man die Empfangsantenne noch um einen Abschlusswiderstand mit 50 Ω in Segment 82. „Segment 82“ ist nicht schwer zu verstehen, denn die Sendeantenne besteht aus 2 x (9 + 11) + 1 = 41 Segmenten. Durch das Kopieren verdoppelt sich die Anzahl und das letzte Segment in dieser Reihe ist eben das Verbindungssegment zwischen den Dipolarmen mit der Nummer „82“.

Dazu fügt man nach der „GE“ = Geometry End-Karte eine „LD“-Karte als folgende Zeile im NEC-File ein:

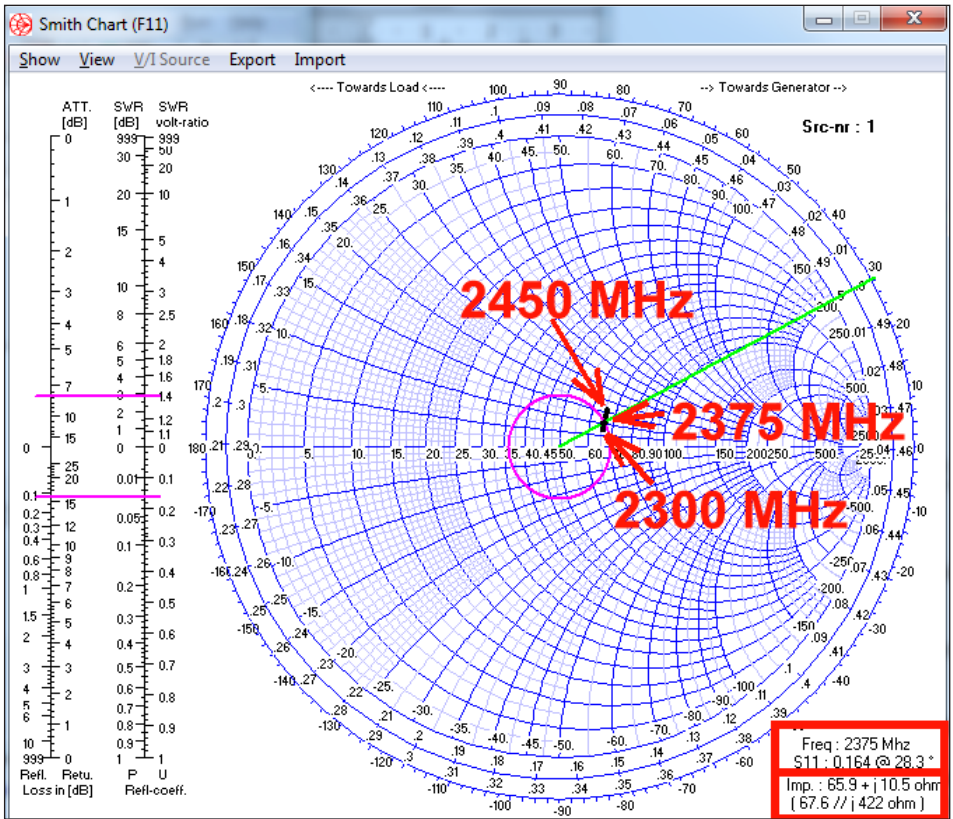


Bild 26: ...denn es ist besser als die Simulation!

- LD 0 110 11 50
- Bedeutung:
- 0 Füge einen Reihenwiderstand ein
 - 110 Gehe in „tag 110“ und
 - 1 1 ...füge den Widerstand zwischen Anfang und Ende von Segment 1 des „tags 110“ ein
 - 50 der Widerstandswert beträgt 50 Ω.

Nach der Änderung und dem korrekten Abspeichern als NEC-File simuliert man das Fernfeld. Wir senden jetzt - wieder wegen des großen Abstandes von 4 m zwischen beiden Antennen! - mit einer

Leistung von 2 Megawatt und suchen anschließend die neue Antenne im „3D-Pattern“ (= Taste F9).

Dazu betrachtet man **Bild 28** genauer an, denn darin wurde über „ldent“ das Segment 82 aufgerufen. In ihm befindet sich der vorgesehene Lastwiderstand in der Empfangsantenne, der durch den bekannten blauen Würfel dargestellt wird. (Wer nochmals wissen will, wie man auf Segment 82 kommt: Die Sendeantenne besteht aus $2 \times (9 + 11) + 1 = 41$ Segmenten - folglich sind es nach dem Kopieren

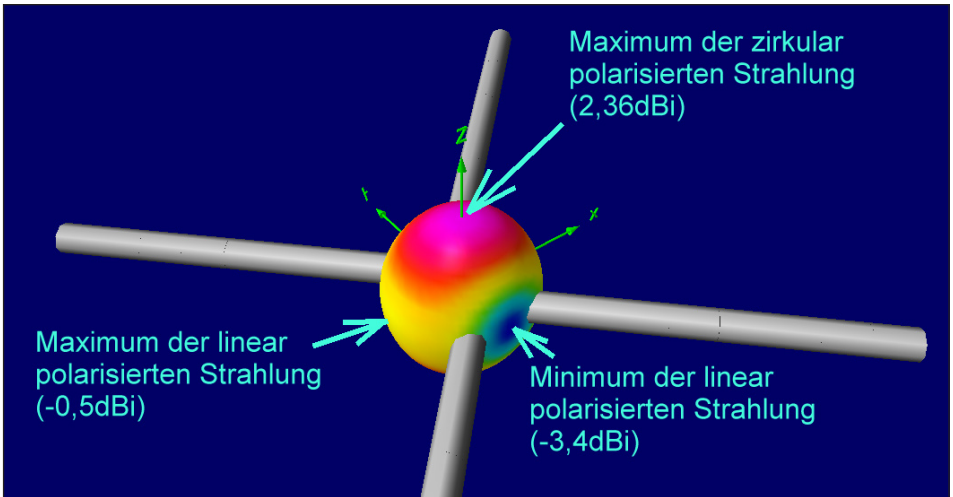


Bild 27: Der Blick auf die Strahlung in unterschiedliche Richtungen ist interessant!

82 und das letzte in Reihe ist der Ort des Lastwiderstandes).

für Segment 82 zeigt nicht nur alle mechanischen Daten, sondern auch die Nummer von „Tag, Wire und Segment“.

Die eben im Bild 28 eingeblendete Liste

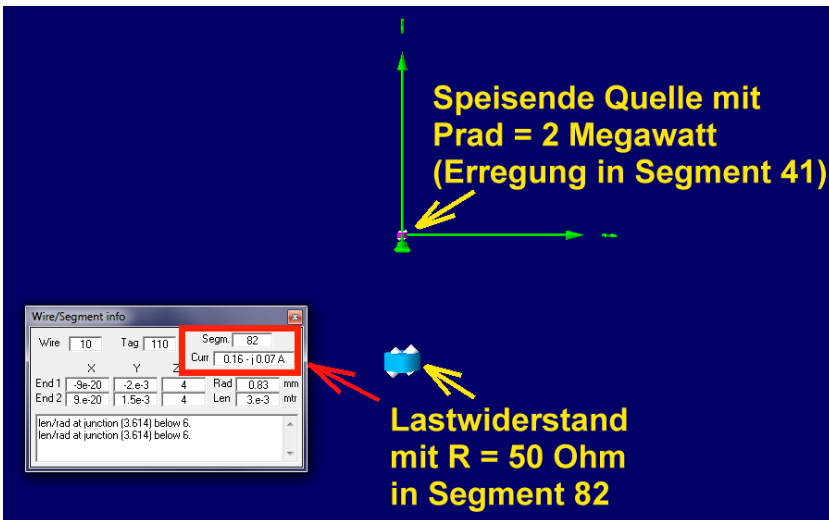


Bild 28: Auf ein Neues! Zur Bestimmung der zirkularen Polarisation erstellt man einfach eine Kopie der Sende-Antenne und achtet dabei auf die Tücken, die da lauern (siehe Text)

Und natürlich auch den im Widerstand fließenden Strom mit $I = 0,16 - j0,07$ A.

ABER:

Bei einer perfekten Zirkularpolarisation sollte in diesem Fall der Wirkstrom = Null sein, denn es gilt eine wichtige Regel:

Man stelle sich vor, dass die Sende-Antenne auf der uns zugewandten Seite rot „angepinselt“ sei. Die Empfangsantenne ist lediglich eine um 4 m parallel nach oben verschobene Kopie und wäre deshalb, wenn man von oben auf sie herabblickt, auf der uns zugewandten Seite ebenfalls rot angemalt.

Bei einer zirkular polarisierten Abstrahlung muss dagegen die Empfangsantenne mit ihrer roten Seite in Richtung Sendeantenne schauen. Nur dann stimmt die Polarisation und man kann etwas empfangen - also schwenkt man die Empfangsantenne um 180 Grad (= Eintrag von „180“ bei der „X-Rotation“ in der GM-Zeile!

Das geht ganz einfach, wenn man den letzten „GM = Geometry Move“-Befehl so abändert (...bitte das korrekte „Beenden“ nicht vergessen):

```
GM 100 1 180 00 002 1
```

Ruft man nun wieder Segment 82 auf, so findet man jetzt einen Strom von $-0,8 + j0,31$ A. Also ist der im Lastwiderstand fließende Strom doch deutlich angestiegen.

Nun wird die Form des Strahlungsdiagramms betrachtet. Dazu rotiert man die Empfangsantenne in 90 Grad-Schritten um die senkrechte Z-Achse, indem man in obigem „GM“-File den Eintrag von 180 Grad für die X-Rotation belässt, aber bei der folgenden Z-Rotation nacheinander mit

90 / 180 / 270 Grad Drehung simuliert.

Ergebnis:

Keine Drehung (= Null Grad):

$$I = -0,8 + j0,31 \text{ A}$$

Drehung um 90 Grad:

$$I = -0,3 - j0,74 \text{ A}$$

Drehung um 180 Grad:

$$I = 0,8 - j0,31 \text{ A}$$

Drehung um 270 Grad:

$$I = 0,3 + j0,74 \text{ A}$$

Der Unterschied zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert beträgt etwa 6,5 dB. Da man es mit zwei identischen Antennen zu tun hat, gehört zu jeder Antenne die Hälfte. Also kann man sagen:

In vertikaler Richtung erhält man eine elliptisch polarisierte Strahlung, deren Diagramm um 3,25 dB „eiert“. (Korrekte Formulierung: Elliptische Polarisation mit einem Axial Ratio „AR“ von 3,25 dB). Und das „Vor-Rückverhältnis“ beträgt nur etwa 10 dB.

b. Die lineare Polarisation in der Kreuzdipol-Ebene (= X-Y-Ebene)

Um hier eine Lösung zu erhalten, geht man entsprechend Kapitel 3.2. vor (...„eine zweite Antenne muss her...“) und ordnet einen einfachen Dipol in 4 m Entfernung vom „Hubschrauber“, aber genau in seiner X-Y-Ebene an. So kann man nach der Simulation auch einen Vergleich mit der Zirkularstrahlung in senkrechter Richtung ziehen. Gesendet wird erneut mit 2 Megawatt.

Deshalb ergänzt man das NEC-File in folgender Weise (**Listing 7**):

Nach der Simulation wird diesmal der Strom in Segment 87 (= Mitte des Mess-



--- Listing 7:

SY freq=2375
 SY dips=300/freq/2*0.42
 SY dipl=300/freq/2*0.527
 SY dr=0.00166/2
 SY x=0.975

SY dipollinear=300/freq/4*0.907 Zusätzliche Linear-Dipolhälfte mit Verkürzungsfaktor

GW 1	9	0	0.0015	0	-dips*sin(45)*x	dips*sin(45)*x+0.0015	0	dr
GW 2	11	0	0.0015	0	dipl*sin(45)*x	dipl*sin(45)*x+0.0015	0	dr
GM 5	1	0	0	180	0	0	0	1
GW 10	1	0	-0.0015	0	0	0.0015	0	dr
GM 100	1	180	0	0	0	0	0	4
GW 200	9	4	-dipollinear	0	4	dipollinear	0	dr

Messdipol wird um 4 m in X – Richtung verschoben

GM 0 0 0 0 0 0 200

zusätzliche Umschaltmöglichkeit für Messdipol zwischen H - und V-Polarisation vorsehen.
 Die Kopie hat den Tag = 200

GE
 LD 0 200 5 5 50 50 Ω Last befindet sich in Tag 200, Segment 5
 FR 0 1 0 0 freq
 EK
 EX 0 10 1 0 1 0
 EN

dipols) ermittelt und anschließend die Messantenne in 90 Grad-Schritten um die Z-Achse gedreht. Dabei fließen in Segment 87 (=...dort ist der Lastwiderstand eingebaut...) folgende Ströme:

Keine Drehung (= Null Grad):

$$I = 0,6 - j0,04 \text{ A}$$

Drehung um 90 Grad:

$$I = 0,1 + j0,44 \text{ A}$$

Drehung um 180 Grad:

$$I = -0,6 + j0,04 \text{ A}$$

Drehung um 270 Grad:

$$I = -0,1 - j0,44 \text{ A}$$

Drehung um 360 Grad:

$$I = 0,6 - j0,04$$

usw.

Stellt man dagegen die Empfangsantenne senkrecht (durch eine Drehung um $x = 90$ Grad), erhält man nur einen Strom, der viel kleiner als 1 mA ist. So soll es ja

auch bei reiner horizontaler Polarisation sein, wenn der Empfangsdipol senkrecht steht. Aber dass das Richtdiagramm in horizontaler Richtung etwas „eiert“, sieht man schon bei einem Blick auf Bild 24.

... wird fortgesetzt.

5. Literatur

[1] Gunthard Kraus, „Empfängerbau mit 50 Ω-Baugruppen (= „Gainblocks“) und SDR-Stick. Teil 4: Empfang des 13-cm-Bandes“. UKW-Berichte 3/2017, Seite 161 - 186

[2] <http://www.ok1rr.com/files/NEC2MP.ZIP>

[3] Quick and Cheap Omni Antenna for 1296 MHz, Paul Wade, W1GHZ, w1ghz@arrl.net