

Antennenberechnungen mit 4NEC2

Elektromagnetische Felder

Elektromagnetische Felder können wir nicht mit unseren Sinnen wahrnehmen. Wir können sie aber messen oder berechnen.

Aus dem Stromverlauf über eine Antenne läßt sich das abgestrahlte elektromagnetische Feld berechnen¹. Zunächst müssen die Ströme auf den Antennenelementen ermittelt werden.

Nehmen wir beispielsweise ein Yagi: Der Strom auf dem gespeisten Sendedipol bewirkt ein Feld, und das bewirkt Ströme auf den anderen Antennenelementen. Der Strom auf dem z.B. ersten Direktor-Element bewirkt dann wiederum Ströme auf allen Antennenelementen, und so weiter. Jedes Antennenelement beeinflusst also alle anderen.

Dies läßt sich mit mathematischen Modellen nachbilden und mittels Numerischer Mathematik lösen (daher der Name des Programms, NEC = Numerical Electromagnetics Code).

Nahfeld und Fernfeld

Man kann das von einer Antenne abgestrahlte elektromagnetische Feld in drei Zonen einteilen².

Nahfeld		Fernfeld
Reaktives Nahfeld	Strahlendes Nahfeld	
Das Feld beginnt, von der Antenne abzustrahlen. Es bestehen aber noch starke Wechselwirkungen zwischen der Antenne und der sich bildenden Welle.	Das Feld hat sich von der Antenne abgelöst, es muß sich aber erst noch durch Phasenverschiebung in einen stabilen Zustand umwandeln	Am Empfangsort kann aufgrund des großen Abstands die Antenne als Punktstrahler und das Feld als ebene Welle betrachtet werden. E-/H-Feld sind in Phase und über den Feldwellenwiderstand (377 Ohm) verbunden.
Geht bis zur Entfernung $r = \lambda/2\pi \approx \lambda/6$		Das Fernfeld beginnt bei $r = 4\lambda$ (Messungen des Antennendiagramms erst gut ab $r \geq 8\lambda$)
		Gesucht: Antennendiagramm, Gewinn; VSWR, Impedanz?
Gesucht (in Verbindung mit Sendeleistung und Abstand): Personenschutzabstand?		

Berechnung vs. Messung

Berechnungen und Messungen haben spezifische Vorteile und Einschränkungen, die sie (ggfs. in Kombination) zum Mittel der Wahl machen.

¹ Antennen werden als Sendeantennen berechnet.

² Diese Einteilung (mit diesen Grenzen) wird u.a. von der Bundesnetzagentur verwendet. Sie gilt für die im Amateurfunkbereich üblichen Antennen mit einer Länge in der Größenordnung von $\lambda/4$ bis $\lambda/2$. Bei Antennen, die groß gegenüber der Wellenlänge sind (z.B. Parabolspiegel, Radarantennen), beginnt das Fernfeld in größerer Entfernung.

Antennenberechnungen mit 4NEC2

Antennen-Berechnung	Messung an Original-Antenne	Messen am Antennen-Modell
<ul style="list-style-type: none"> • relativ einfaches, zeitsparendes Verfahren • einfache Variation von Parametern • geht auch, wenn Messen schlecht möglich ist 	Die „Wirklichkeit“	Fast die „Wirklichkeit“
Mathematisches Modell: <ul style="list-style-type: none"> • Modell bildet Wirklichkeit nicht vollständig ab • begrenzte Rechengenauigkeit • Umwelt wird nur berücksichtigt, soweit das im Modell möglich ist und soweit Daten eingegeben werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Fernfeld: ausreichender Abstand von der zu vermessenden Antenne! • Nahfeld: evtl. Beeinflussung durch Meßanordnung; evtl. Ungleichgewicht E-/H-Feld; evtl. lokale Feldüberhöhungen • alle Umgebungseinflüsse in Messung enthalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung des Schlankheitsgrads (→Verkürzungsfaktor, Bandbreite) • Skineffekt bei höheren Frequenzen (→Erhöhung des Widerstands) • sonstige frequenzabhängige Effekte (z.B. Bodenreflexion)
<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz im kommerziellen, wissenschaftlichen und militärischem Bereich • Einsatz im Amateurfunkbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • bei höheren Frequenzen besser möglich • im Kurzwellenbereich evtl. wenigstens punktuelle Messungen zur Verifizierung 	Messung am Modell bei kleineren Dimensionen (bei höheren Frequenzen) einfacher als am Original

Berechnungsverfahren

Auch schon früher gab es einzelne Formeln und Regeln für die Dimensionierung bestimmter Antennen. Sie sind nach wie vor hilfreich.

Auf der Basis von Roger F. Harrington's Buch „Field Computation by Moment Methods“ entwickelten die Lawrence Livermore Laboratories um 1980 NEC (Numerical Electromagnetics Code) als rechnergestütztes Verfahren zur Antennenberechnung in der Programmiersprache Fortran. Die Dateneingabe erfolgte mit Lochkarten zu 80 Zeichen, die Ausgabe mit gedruckten Zahlenkolonnen.

Seit 1980 entwickelten sich die Dinge in drei Richtungen weiter:

- NEC2 wurde frei und kostenlos zugänglich. Die leistungsfähigere Weiterentwicklung NEC4 (aktuell in der Version 4.2) ist gegen Lizenzgebühr verfügbar.
- NEC wurde auf PCs portiert. Dazu kamen komfortable grafische Bedieneroberflächen. Vor allem in den USA ist EZNEC verbreitet. Der NEC2 Rechenkern ist zwar frei, EZNEC ist allerdings z.T. kostenpflichtig, abhängig von der Anzahl der berechenbaren Segmente. Das von Arie Voors in den Niederlanden entwickelte 4NEC2 ist Freeware. Sowohl EZNEC als auch 4NEC2 kann statt mit dem NEC2 Rechenkern auch mit dem kostenpflichtigen NEC4 Rechenkern betrieben werden.
- NEC behandelt Ströme in Längsrichtung von Drähten; Flächen können durch Drahtnetze simuliert werden. Mit der Zeit entstand ein höherer Bedarf, Flächen und Körper nachzubilden. Dazu entstanden andere Berechnungsverfahren und Programme.

Antennenberechnungen mit 4NEC2

Im Amateurfunkbereich, wo wir es in erster Linie mit Antennendrähten und -stäben zu tun haben, ist NEC nach wie vor das Mittel der Wahl für Antennenberechnungen.

In folgenden Fällen ist eine Berechnung mit NEC4 statt NEC2 erforderlich³:

- kleine ($h < \lambda/200$) oder gar keine Abstände von Elementen (z.B. von Radials) zum Erdboden
- sehr kleine seitliche Abstände zwischen Elementen
- im Durchmesser schlanker werdende oder elektrisch sehr kurze Antennen
- Dielektrika

4NEC2

Eingabemöglichkeiten bei 4NEC2

- komfortabler Tabellen-Editor mit Plausibilitätsprüfungen und mit symbolischen Variablen
- einfacher Editor (alle NEC Steuerbefehle einsetzbar; bei Verwendung des NEC4 Rechenkerns nötig)
- grafischer Editor
- Textdatei mit Kommandozeilen (Dateierweiterung '.nec'; auch die Dateiformate *.ez und *.ao sind lesbar). 4NEC2 enthält eine Bibliothek von Antennen-Beispieldateien.

Die einfache Generierung einiger geometrischen Strukturen wird unterstützt.

Regeln für Elemente und Segmente

Antennen bestehen in NEC aus einzelnen Elementen, die in gerade Segmente weiter unterteilt sind. Insgesamt sind in 4NEC2 bis zu 11000 Segmente möglich.

- Man kann die Anzahl der Segmente für jedes einzelne Element definieren; das Programm kann dies auch automatisch übernehmen anhand einer Vorgabe der Elementzahl pro λ . Um die Belastbarkeit der Lösung zu prüfen, kann man die Konvergenz untersuchen durch schrittweises Erhöhen der Segmentzahl.
- $\lambda/20 \geq$ empfohlene Segmentlänge $\geq \lambda/200$
- Segmentlänge (bei aktiviertem 'Extended Kernel') $\geq 2 \cdot$ Durchmesser
- Aneinander grenzende Segmente sollen gleiche oder ähnliche Längen haben
- Nahe parallel gelegene Segmente sollen gleich lang und nicht gegeneinander versetzt sein
- In spitzem Winkel verbundene Segmente sollen sich höchstens zu 1/3 überlappen
- Die Erregung der Antenne mit Spannung oder Strom erfolgt innerhalb eines Segments
- Diskrete Induktivitäten, Kapazitäten und Bandsperrern sitzen ebenfalls in Segmenten.
- Segmente dürfen in NEC2 nicht den Erdboden berühren, außer den ideal leitenden Perfect Ground oder den MININEC⁴ Ground. Mindestabstand $\lambda/10$ bei Fast Ground bzw. $\lambda/200$ bei Real Ground

Elemente dürfen sich untereinander nur an ihren Enden berühren

Überprüfung der Ergebnisse

Es wird empfohlen, das Ergebnis mit anderen Methoden zu verifizieren (andere Berechnungsmethode, Messung).

Innerhalb des Programms kann man mit einem Konvergenztest durch Steigerung der Segmentzahl prüfen, ob das sich Ergebnis mit steigender Rechengenauigkeit stabilisiert. Und mit dem Average Gain Test kann man über die insgesamt abgestrahlte Leistung die Plausibilität des Fernfeld-diagramms prüfen.

³ Für schlanker werdende Durchmesser und für die Isolation bei Antennendrähten gibt es in 4NEC2 Hilfslösungen

⁴ Das MININEC Programm spielt kaum noch eine Rolle. Das Bodenmodell existiert jedoch weiter. An der Antenne erlaubt es Verbindungen mit dem Boden als Gegengewicht; weiter weg reflektiert der Boden das Feld.

Weiterführende Informationen

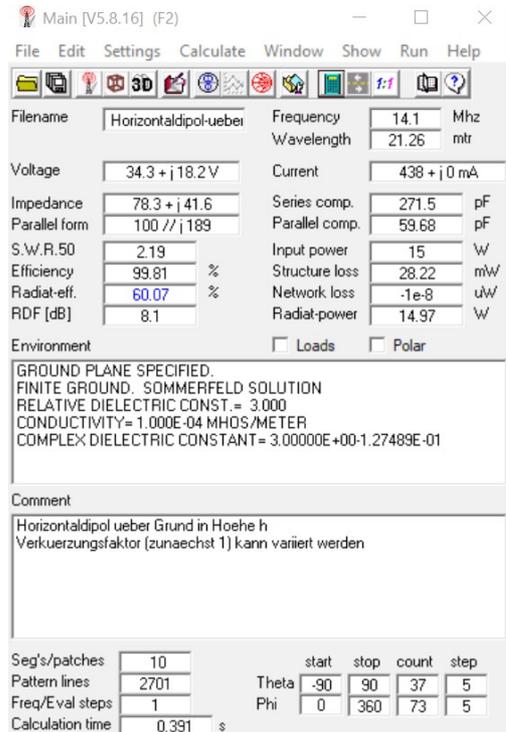
- Downloadseite für 4NEC2:
<https://www.qsl.net/4nec2/>
- 4NEC2 Anleitung:
<https://hamwaves.com/antennas/doc/4nec2.rtf.pdf>
- 4NEC2 Tutorial (in Deutsch) - *Gunthard Kraus, DG8GB*:
www.gunthard-kraus.de/4NEC2/pdf-File/Tutorial_4NEC2_deutsch.pdf
- Antennenmodellierung mit 4NEC2 für die BEMFV-Anzeige - *Georg Latzel, DL6GL*:
<http://dl6gl.de/anzeige-nach-bemfv/1-antennenmodellierung-mit-4nec2>
- „4NEC2 Definite Guide“ - *Mark Schoonover, KA6WKE*:
(Das Buch ist per 11/2017 zu 35% fertig. Man kann es mit dem aktuellen Stand kaufen und herunterladen; wenn der Autor durch genügend Käufe motiviert ist, schreibt er es fertig.)
<https://leanpub.com/4nec2definitiveguide>
- „Antenna Modeling for Radio Amateurs“ - *Steve Stearns, K6OIK*
(Vortrag mit Informationen u.a. zur Mathematik, zu anderen numerischen Berechnungsverfahren, zu Beispielen aus dem kommerziellen Bereich):
https://www.fars.k6ya.org/docs/K6OIK,_Antenna_Modeling_for_Radio_Amateurs,_ARRL_Pacificon,_Oct_2017.pdf
- Youtube Videos: Vergleich zweier Antennen (Messung; Berechnung) - *Michael Pfeiffer, NO7ON*; *Carol F. Milazzo, KP4MD* (Die Berechnung zeigt, daß das Meßergebnis offenbar durch eine nicht erkannte Beeinflussung im Nahfeld verfälscht war)
<https://www.youtube.com/watch?v=df3v41Y4u60>
<https://www.youtube.com/watch?v=yAO6836Ksos>
- A Universal HF Magnetic Loop Antenna NEC Model - *Carol F. Milazzo, KP4MD*:
<https://www.qsl.net/kp4md/magloop.htm>
- The Balcony Mounted Magnetic Loop Antenna, A NEC Model Comparative Analysis of Physical Orientation and Performance - *Carol F. Milazzo, KP4MD*:
<https://www.qsl.net/kp4md/balconyloop.htm>
- Im Internet findet man Beispiele von Eingabedateien (Dateierweiterung '.nec') für verschiedene Antennentypen.
- NEC2 Anleitung (von 1981):
www.nec2.org/other/nec2prt3.pdf
- NEC2 Mathematische Grundlagen (von 1981) :
<http://www.nec2.org/other/nec2prt1.pdf>
- Der „Numerical Electromagnetics Code“ NEC - Ein Streifzug durch das Berechnungsverfahren, *Rolf Schick, DL3AO* (leichter verständliche Erklärung der Mathematik)
<https://p02.de/2008/01/09/skript-antennenworkshop-der-numerical-electromagnetics-code-nec-rolf-dl3ao/>
- Auch Unterlagen über EZNEC enthalten gute Erläuterungen zum Einsatz von NEC2, z.B.:
www.arrl.org/files/file/Antenna%20Modeling%20for%20Beginners%20Supplemental%20Files/EZNEC%20Modeling%20Tutorial%20by%20W8WWV.pdf

Bildschirmfotos

der grundlegenden Funktionen am Beispiel eines horizontalen Dipols

Hauptfenster

Das Hauptfenster des Programms („Main“) ist ständig geöffnet. Es zeigt wesentliche Daten der betrachteten Antenne, und es lassen sich weitere Fenster aufrufen.



Dateneingabe

Im „NEC Editor (new)“ können die Daten manuell eingegeben oder bearbeitet werden.

Die Definition von symbolischen Konstanten erleichtert den Überblick bei der Beschreibung der Elemente. Und spätere Änderungen sind an dieser zentralen Stelle einfach möglich.

Einfache konstante Variable (die in der Definition nur eine Wertzuordnung aber keine Rechenoperation enthalten) können für Optimierungsrechnungen auch als Variable verwendet werden.

Symbols			Geometry	Source/Load	Freq./Ground	Others	Comment
Symbols							
Nr	Symbols and equations	comment					
1	f=14.1	Frequenz in MHz					
2	wl=300/f	Wellenlaenge in m					
3	vf=1	Verkuerzungsfaktor (zunaechst 1)					
4	dl=wl/2*vf	Dipollaenge					
5	h=wl/2	Hoehe der Antenne ueber Grund					
6	dd=0.015	Dipoldurchmesser in m					
7	dr=dd/2	Dipolradius					

Alle Elemente sind durchnummeriert. Dieser Dipol besteht nur aus einem Element (mit seinen Anfangs- und Endkoordinaten und mit einer zunächst manuell vorgegebenen Einteilung in 9 Segmente). Eine ungerade Zahl von Segmenten erlaubt das mittige Platzieren von Source/Load.

Symbols			Geometry							Source/Load	Freq./Ground	Others	Comment
Geometry (Scaling=Meters) <input type="checkbox"/> Use wire tapering													
Nr	Type	Tag	Segs	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Radius			comment
1	Wire	1	9	0	-dl/2	h	0	dl/2	h	dr			Dipol parall. Y-Achse

Die Antenne wird als Sendeantenne berechnet. Eine Stromquelle ist im mittleren Segment Nr. 5. Die Antenne besteht aus einem Alu Stab. R-, L-, C-, Trap- Elemente gibt es im Beispiel nicht.

Symbols			Geometry		Source/Load				Freq./Ground	Others	Comment
Source(s) <input checked="" type="checkbox"/> Show source <input checked="" type="checkbox"/> Show loads <input type="checkbox"/> Show Tr-line											
Nr	Type	Tag	Seg	(opt)	Real	Imag	Magn	Phase	(norm)	comment	
1	Current-src	1	5	0	1	0	1	0	0	Stromquelle im mittleren Segment	
Load(s)											
Nr	Type	Tag-nr	First-seg	Last-seg	Cond [S]					comment	
1	Wire-conduc	1	0	0	Alumin.						

Antennenberechnungen mit 4NEC2

Die Frequenz wird aus der definierten Konstante f übernommen. Als Erdboden wird das Sommerfeld-Norton Modell „Real Ground“ verwendet, mit den Parametern für „city industrial area“.

„Others“: Der für dickere Antennenelemente nötige „Extended Kernel Rechenkern kann bei der Leistungsfähigkeit heutiger PCs immer aktiviert bleiben.

„Comment“: Die Kommentarzeilen erscheinen am Anfang der *.nec Parameterdatei. Beim Durchsuchen der im PC gespeicherten Antennendateien erleichtert ein aussagekräftiger Text die Auswahl einer geeigneten Dateivorlage.

Die Eingabedaten werden in einer *.nec – Datei gespeichert:

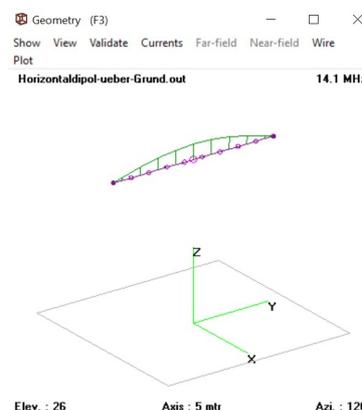
```

CM Horizontaldipol ueber Grund in Hoehe h
CM Verkuerzungsfaktor (zunaechst 1) kann variiert werden
CM
CE
SY f=14.1      'Frequenz in MHz
SY wl=300/f    'Wellenlaenge in m
SY vf=1        'Verkuerzungsfaktor (zunaechst 1)
SY dl=wl/2*vf 'Dipollaenge
SY h=wl/2      'Hoehe der Antenne ueber Grund
SY dd=0.015    'Dipoldurchmesser in m
SY dr=dd/2     'Dipolradius
GW 1 9 0 -dl/2 h 0 dl/2 h dr 'Dipol parall. Y-Achse
GE -1
LD 5 1 0 0 37700000
GN 2 0 0 0 3 0.0001
EK
EX 6 1 5 0 1 0 0 'Stromquelle im mittleren Segment
FR 0 0 0 0 f 0
EN
    
```

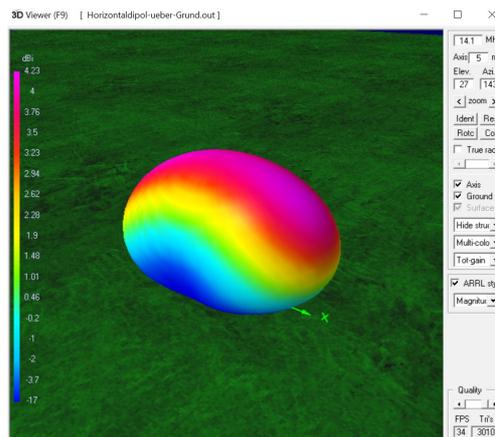
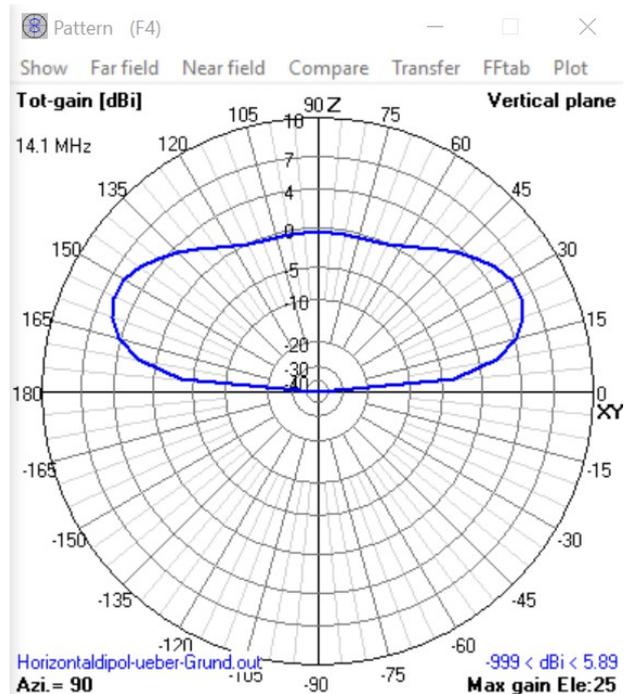
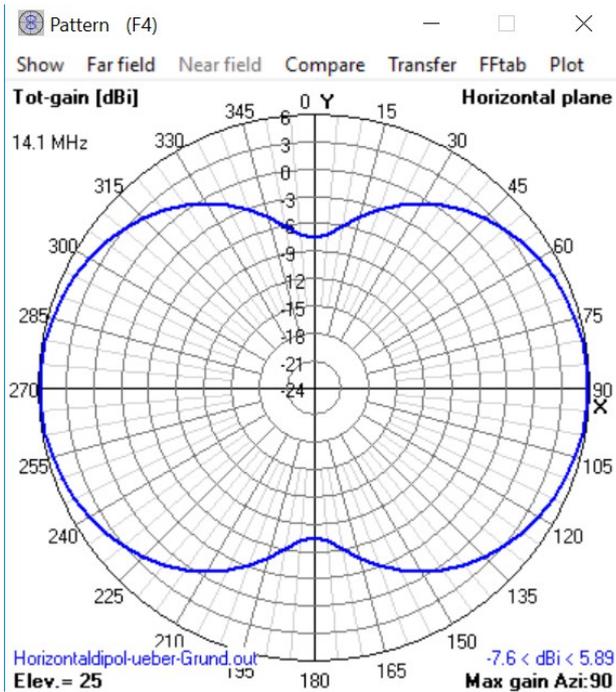
Berechnung

Im Fenster „Geometry“ kann man die Antenne von allen Seiten betrachten. U.a. können auch die Segmente und die Stromverteilung angezeigt werden.

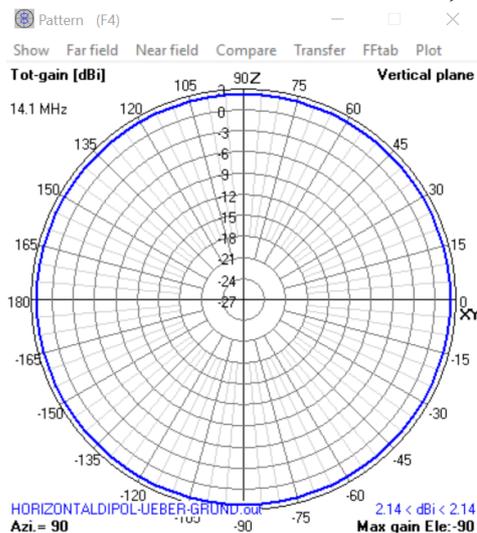
Das mit F7 berechnete Feld kann dreidimensional im 3D-Viewer und in verschiedenen Schnitten im Pattern Fenster betrachtet werden. (Unter „Far Field“ sollte „ARRL“ deaktiviert werden, da sonst die Darstellung für uns ungewohnt nicht komplett logarithmisch ist.



Antennenberechnungen mit 4NEC2



Ohne Boden strahlt die Antenne im vertikalen Schnitt rundum mit einem Gewinn von 2,14 dBi:



Mit Abstand $\lambda/4$ von Boden (statt wie oben $\lambda/2$) strahlt die Antenne stärker nach oben

