

Eingangsimpedanz von Dipol- und Groundplan-Antennen

Das Programm berechnet die Eingangs- bzw. Fußpunktimpedanz eines symmetrischen gestreckten Dipols oder einer Groundplane unter idealisierenden Voraussetzungen auf Basis von Integralen der Antennentheorie und ist für erste Abschätzungen gut geeignet.

Die breitbandige Frequenzachse lässt auf einen Blick erkennen, welche Amateurfunkbänder sich bei gegebener Antennenlänge besonders gut und welche sich schlecht oder überhaupt nicht anpassen lassen.

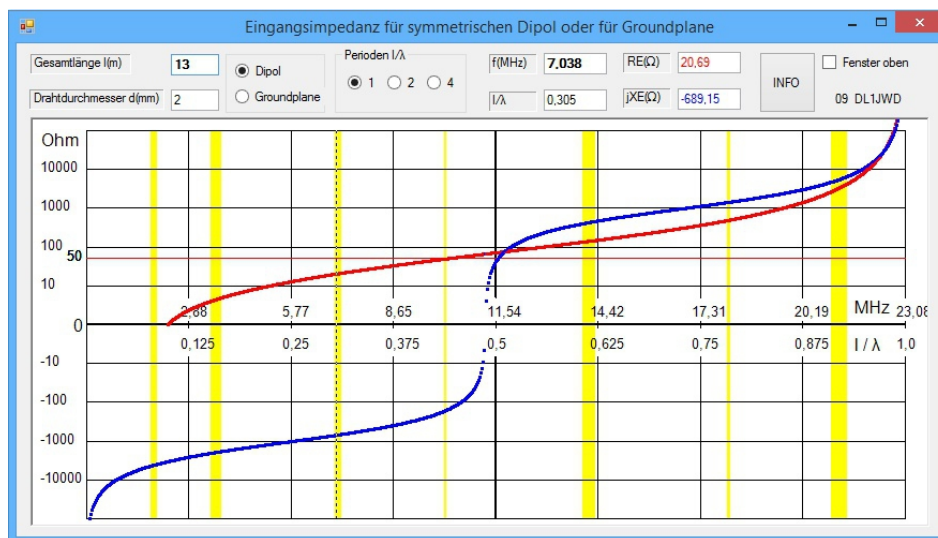
Haben Sie die Fußpunktimpedanz der Antenne ermittelt, so können Sie mit dem Programm "Kabelrechner" die Eingangsimpedanz der Speiseleitung bestimmen und sich anschließend (z.B. mit dem Programm "Pi- vs. T-Koppler") eine geeignete Anpass-Schaltung berechnen lassen.

Beispiel 1:

Mittengespeiste Dipole sind aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften besonders beliebt, im Multi-bandbetrieb werden sie in der Regel auch außerhalb ihrer Resonanzfrequenz betrieben, bekanntestes Beispiel ist die Doppelzepp.

Wie groß ist die Eingangsimpedanz eines 2x6,5m Dipols auf dem 40m-Band?

Nach Programmstart haben Sie nichts weiter zu tun als die Gesamtlänge des Dipols (13m) und die Drahtstärke (2mm) einzugeben und mit der ENTER-Taste (oder Klick auf das Diagramm) abzuschließen:



Sie überblicken sofort den Verlauf von Real(rot)- und Blindanteil (blau) der Eingangsimpedanz in Abhängigkeit von der normierten Dipollänge l/λ bzw. der Frequenz.

Die Bereiche der Amateurfunkbänder sind gelb unterlegt.

Ziehen Sie mit der Maus am rechten oder am unteren Fensterrand und vergrößern oder verkleinern Sie so das Diagramm um es der Bildschirmauflösung Ihres PCs bequem anzupassen.

Bewegen Sie mit der Maus das Frequenzlineal entlang der Skala, so werden am oberen Fensterrand die aktuelle Frequenz, die normierte Länge sowie Real- und Blindanteil der Fußpunktimpedanz kontinuierlich angezeigt.

Für das 40m-Band liest man einen Wert von ca. $Z_e(\text{Ohm}) = 20 - j690$ ab.

Die normierte Dipollänge $l/\lambda = 0,5$ (Halbwellendipol) befindet sich genau in der Mitte des Diagramms und ist mit einer dicken senkrechten Linie hervorgehoben. Wenn Sie genau hinschauen erkennen Sie aber, dass die entsprechende Frequenz (11,54MHz) noch nicht die Resonanzfrequenz des Dipols ist, denn die liegt etwas tiefer, warum?

Wie Sie am Verlauf der blauen Linie sehen, ist die Eingangsimpedanz $Z_e(\text{Ohm}) = 73,3 + j42,5$ an dieser Stelle noch mit einer induktiven Blindkomponente behaftet.

Erst durch Kürzung des Halbwellendipols um ca. 5%, kann dieser resonant gemacht werden /2/.

Weil sich die Eingangsimpedanz in Abhängigkeit von der Frequenz zwischen wenigen Ohm bis hin zu Zehntausenden Ohm verändert, habe ich die vertikale Achse logarithmisch geteilt, d.h., die Werte erscheinen nach oben hin extrem gestaucht. Das erkennen Sie u.a. auch am Verlauf der roten 50Ohm-Linie.

Es dürfte klar sein, dass Eingangsimpedanzen größer 10000 Ohm nur von rein theoretischem Interesse sind und in der Praxis deutlich geringer ausfallen, wie VNA-Messungen oder ein Vergleich mit den Ergebnissen des Antennensimulationsprogramms MMANA bestätigen.

Sie können eine bestimmte Frequenz auch direkt über die Tastatur eingeben. Nachdem Sie die Eingabe mit der ENTER-Taste abgeschlossen haben, wird diese Frequenz mit einer senkrechten roten Linie markiert und die entsprechende Eingangsimpedanz kann in den Anzeigefeldern für RE und jXE abgelesen werden. Nach Klick auf das Diagramm verschwindet die rote Linie wieder.

Beispiel 2:

Auch die Eingangsimpedanz von Vertikalstrahlern lässt sich mit diesem Programm nach dem gleichen Prinzip wie bei Dipolantennen berechnen, eine ideale Erde vorausgesetzt.

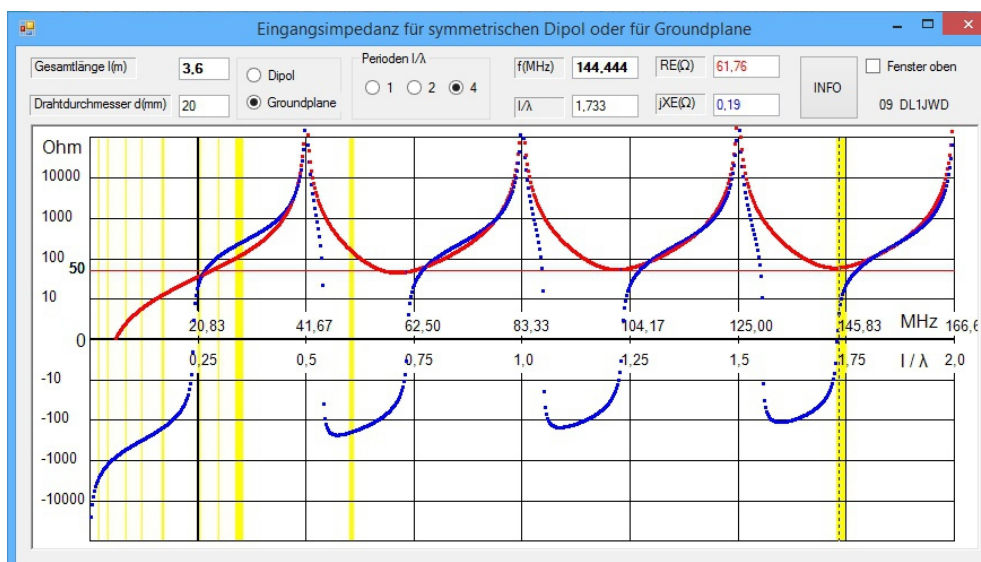
Für das 2m-Band möchte ich eine Groundplane bauen, wobei max. 4m Alurohr mit einem Durchmesser von 2cm zur Verfügung steht. Die Fußpunktimpedanz soll möglichst nahe 50 Ohm liegen, sodass auf ein Anpassglied verzichtet werden kann.

Wie lang muss der Strahler sein?

Geben Sie zunächst als Gesamtlänge 4m ein und auch die Drahtstärke(20mm).

Klicken Sie nun den "Groundplane"-Button. Anschließend vergrößern Sie die Periodenzahl auf 4, damit am rechten Rand der Frequenzskala auch noch das 2m-Band erscheint.

Wie Sie sehen, befindet es sich noch etwas oberhalb einer Stromresonanz, sodass Sie die Gesamtlänge des Strahlers sukzessive verkürzen müssen, bis RE den geringstmöglichen Wert (ca. **62Ohm**) bei gleichzeitigem Nulldurchgang der Blindkomponente (jXE ca. 0,20hm) erreicht hat. Dies ist etwa bei einer Aufbauhöhe von **3,6m** der Fall:



Wie Sie leicht mit dem Programm "Anpassungsverluste" nachprüfen können, beträgt das bestmögliche SWV = 1,26 und die Verluste durch Fehlanpassung sind vernachlässigbar (0,06dB).

Zum Vergleich: Die Simulation dieser 3,6m-GP mit dem "großen" Programm MMANA-GAL kommt bei 145MHz zu einer Eingangsimpedanz $Z_e(\text{Ohm}) = 72,86 + j4,5$.

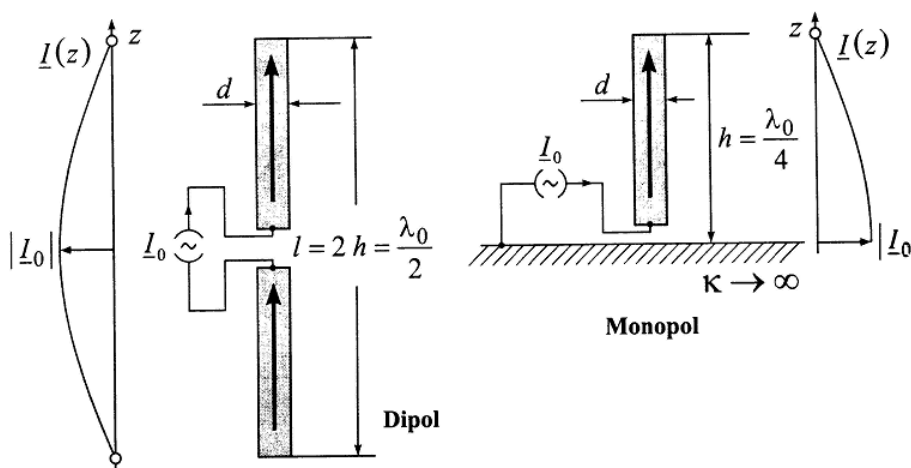
Diese Abweichung bewegt sich also, zumindest für die durchschnittlichen Ansprüche eines Amateurfunkers, im vertretbaren Rahmen.

Theorie

Die sogenannte **Linearantenne** ist eine der gebräuchlichsten Strahlerformen, sie besteht in ihrer einfachsten Form aus einem gestreckten zylindrischen Leiter, der in der Regel in der Mitte (Dipol) oder am Fußpunkt gegen Erde (Monopol bzw. Groundplane) erregt wird.

Beide Antennenformen haben im oberen Halbraum das gleiche Strahlungsdiagramm, da die Erdoberfläche in einer Symmetrieebene des elektrischen Feldes liegt.

Bei gleichem Quellenstrom I_0 gibt der Monopol nur die halbe Strahlungsleistung des Dipols ab, Real- bzw. Blindanteil seiner Eingangsimpedanz sind ebenfalls genau halb so groß.



Die Theorie von Strahlungsfeldern und Antennen ist mathematisch hochkomplex, dabei wird meist von der Stromverteilung auf der Antennenoberfläche ausgegangen, die mit dem Strahlungsfeld eindeutig verknüpft ist (das Mantra "Strom strahlt" dürfte jedem OM bekannt sein).

In der Regel müssen diese Oberflächenströme mit numerischen Verfahren aufwändig ermittelt werden.

Ist der Strom an allen Stellen nach Betrag und Phase bekannt, so lässt sich daraus die Feldstärke aus der Superposition (Überlagerung) der einzelnen Stromelemente ermitteln, wobei Phasen- und Entfernungsdifferenzen zwischen den jeweiligen Quell- und Zielpunkten zu berücksichtigen sind. In der Praxis genügen aber oft auch einfache Näherungen, aus denen man in einem zweiten Schritt die Strahlungsfelder durch Integration über die strahlenden Flächen erhalten kann.

Für die Berechnung der Eingangsimpedanz, insbesondere von deren Blindanteil, der die Energiespeicherung im Nahfeld beschreibt, ist jedoch eine genauere Kenntnis der Stromverteilung auf der Antenne erforderlich.

Wie arbeitet der "Dipol-GP-Rechner"?

Das Programm habe ich mit Visual C# entwickelt, diese Software ist ungeheuer leistungsfähig, komfortabel zu bedienen und relativ leicht zu erlernen /3/.

Zunächst berechne ich damit die von einer dünnen Linearantenne abgestrahlte Wirkleistung, die proportional dem sog. Strahlungswiderstand Z_s ist.

Knackpunkt ist dann die Lösung der Integralform des komplexen Strahlungswiderstands Z_s , das führt auf höhere mathematische Funktionen wie Integralsinus und -kosinus, die wiederum nur numerisch zu ermitteln sind.

Die Eingangsimpedanz Z_e (der komplexe Eingangswiderstand) lässt sich hingegen leicht aus der Strahlungsimpedanz Z_s berechnen.

Z_s und Z_e sind für die Stromresonanzen $l = (2n-1) \lambda/2$ identisch (Strombauch im Speisepunkt). Ein schlanker Halbwellendipol hat demnach eine Eingangsimpedanz

$$Z_e = Z_s = (73,1 + j42,5) \Omega.$$

Z_e weist für Dipollängen $l = \lambda \cdot n$ Polstellen auf, ein Ganzwellendipol muss deshalb mit einer Spannungs- und nicht mit einer Stromquelle gespeist werden.

Für diese Spannungsresonanzen gibt es einen Stromknoten im Speisepunkt, damit wird der Eingangswiderstand scheinbar unendlich groß.

Diese Singularitäten haben ihre Ursache im mathematischen Modell der dünnen Linearantenne, bei dem die symmetrische Stromverteilung durch eine stehende Sinuswelle angenähert wird, sie verschwinden bei technisch realen Dipolen mit endlicher Dicke und unter Berücksichtigung der Strahlungsdämpfung.

Die Abweichungen des mathematischen Modells zur Praxis kommen im Bereich der Polstellen immer deutlicher zum Ausdruck, wie sich zum Beispiel durch Messungen oder Vergleich mit einem Antennensimulationsprogramm feststellen lässt.

Damit wird man für Eingangsimpedanzen höchstens Werte um ca. 10k Ω erreichen, während das mathematische Modell astronomisch hohe Zahlen ausspuckt.

Mathematisch interessierte OM's können die von mir verwendeten Formeln zum Beispiel dem Klassiker von Klaus Kark /1/ (Kapitel 10, Lineare Antennen) entnehmen.

Wichtige Anregungen sind u.a. auch im bekannten Buch von OM Gerd Janzen, DF6SJ, zu finden, obwohl dort nur "kurze" Antennen, also unterhalb der Abmessungen eines Halbwellendipols, thematisiert werden.

Ein Wort zu EZNEC & Co

Komplexere Antennengebilde lassen sich nur mit Computerunterstützung sinnvoll analysieren, wobei die Antenne in einzelne Drahtstückchen "zerlegt" wird, deren Fern- und Nahfeldkomponente unter Berücksichtigung von Umweltfaktoren einzeln ermittelt und abschließend wieder "zusammengesetzt" werden.

Die für Amateurfunker wichtigsten Programme sind 4nec2, EZNEC und MMANA-GAL.

Ich bevorzuge das letztere, da es sich strikt an der vertrauten Windows-Oberfläche orientiert, aber ansonsten auf dem gleichen Lösungsalgorithmus (nec Kernel) wie seine Geschwister basiert.

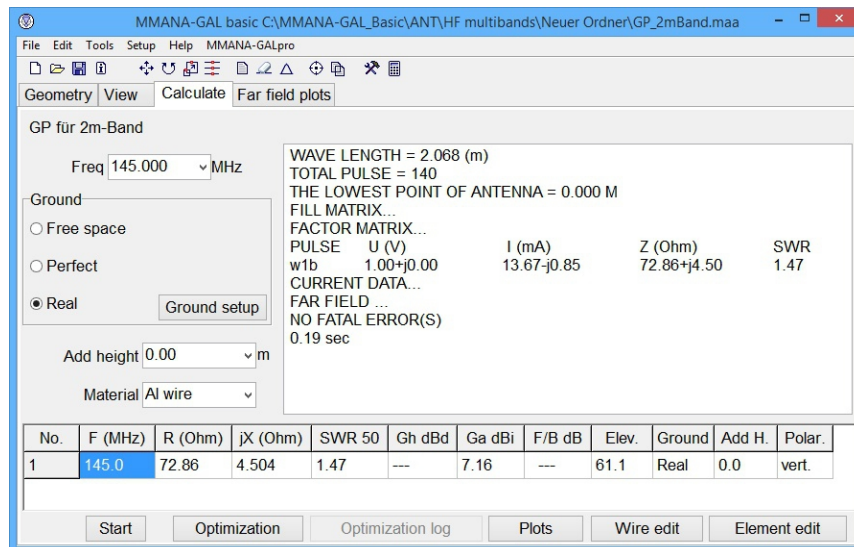
Der Rechenkern wurde vor vielen Jahren von den Mitarbeitern des *Lawrence Livermore Laboratories* in der damals aktuellen Sprache *Fortran* programmiert, diese anspruchsvolle numerische Berechnung der Antenneneigenschaften auf Basis komplexer Differenzialgleichungssysteme war und ist die eigentliche herausragende Leistung!

Die Entwickler von EZNEC, MMANA etc. hatten sich hingegen "nur" mit der Programmierung einer leicht bedienbaren Benutzerschnittstelle auseinanderzusetzen, wobei die Eingabe der

Antennengeometrie in Form einer strikt formatierten Tabelle erfolgt.

Nach erfolgter Berechnung im Kernel werden dessen Ergebnisdaten z.B. in Strahlungsdiagrammen und Impedanztabellen umgesetzt.

Dass die Ergebnisse der Antennentheorie (siehe Beispiel 2) unter den gegebenen vereinfachenden Voraussetzungen gar nicht so sehr von denen der "großen" Programme abweichen, zeigt eine Berechnung der Eingangsimpedanz der 3,6m hohen GP für das 2m-Band mit MMANA:



Literatur

/1/ Kark, K.: Antennen und Strahlungsfelder.
Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2004

/2/ Janzen, G., DF6SJ: Kurze Antennen. 1.Aufl.
Franckh'sche Verlagshandlung W.Keller & Co., Stuttgart 1986

/3/ Doberenz, W., Gewinnus, Th. : Visual C# 2015, Grundlagen, Profiwissen und Rezepte.
Carl Hanser Verlag, München 2015