

Der „Numerical Electromagnetics Code“- NEC Ein Streifzug durch das Berechnungsverfahren

von Rolf Schick, DL3AO

Bis vor 50 Jahren beschränkte sich die exakte Berechnung von Antennen auf einfache Gebilde, wie ein Dipol im Freiraum oder eine Marconi- Antenne über elektrisch idealem Untergrund. Der Einfluss der parasitären Elemente bei einem Yagi-Uda Richtstrahler war mathematisch höchstens unter groben Vereinfachungen des Problems abschätzbar. Die Dimensionierung und Optimierung dieser und vieler anderer Antennen war deshalb auf Versuche und Messungen angewiesen.

Mit dem Bau von Großrechnern änderte sich die Situation. Numerische Verfahren konnten entwickelt und eingesetzt werden, mit denen elektromagnetische Felder auch für komplexe Geometrien und Einspeisungen der elektrischen Leiter einer Antenne und ihrer Umgebung berechnet werden konnten. Für die Funkamateure wurde besonders der Numerical Electromagnetics Code (NEC) interessant. Die Lösungen der im NEC auftretenden mathematischen Gleichungen erfolgen mit einem nicht nur in der Elektrotechnik eingesetzten Rechenverfahren, der sogenannten Momentenmethode (Method of Moments (MoM)). Zur Unterscheidung des NEC gegenüber anderen Verfahren, z. B. der Berechnung über Finite Elemente oder Finite Differenzen, hat sich deshalb auch der Ausdruck „Momentenverfahren“ eingebürgert.

Im NEC werden Antennen aus dünnen und geraden Stäben zusammengesetzt. Der NEC eignet sich demnach nicht zur Behandlung von Hornstrahlern und anderen Volumantennen. Für viele Antennen der Funkamateure stellt jedoch der NEC eine ausgezeichnete Grundlage für eine umfassende und auch stabile Berechnung ihrer Antennen am PC dar.

Eingeführt wurde das Momentenverfahren in die Theorie des Elektromagnetismus von Harrington [1]. Poggio und Burke [2] von den Lawrence Livermore National Labs (USA) entwickelten daraus den NEC. Der Code wurde und wird ständig von zahlreichen Ingenieuren weiter entwickelt. Die erweiterten Anwendungsmöglichkeiten schließen insbesondere den Einfluss des Erdbodens auf die Antenne ein. Mit der neuesten NEC-4 Version können selbst im Erdboden vergrabene Antennen oder zur Antenne gehörende Leiter (Radials) berechnet werden.

Die im Amateurfunk heute gebräuchlichsten NEC Programme sind EZNEC [3] von Roy Lewallen und 4NEC2 [4] von Arie Voors.

Grundlagen

Veranschaulichen wir das Lösungsverfahren an einem 2-Element Yagi für 14 MHz (Abb. 1). Die Antenne befindet sich weit ab von anderen Strukturen (Freiraum), die Elemente sind widerstandsfrei und die Abmessungen der Antenne sind bekannt. Speisen wir in der Mitte des Strahlers einen Strom ein so wissen wir, dass die Verteilung der Antennenströme auf Strahler

und parasitärem Element fest und reproduzierbar vorgegeben ist. Damit werden auch sämtliche Impedanzen, sowie das gesamte Strahlungsfeld im Nah- und Fernfeld bestimmt.

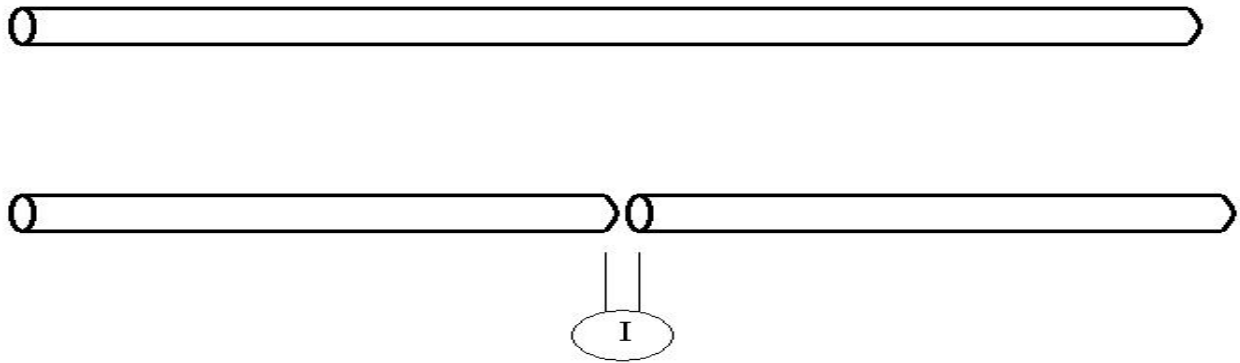


Abb. 1: Grundform eines 2 Element Yagi

Maxwell gelang es 1874, vier Grundgleichungen der Elektrodynamik aufzustellen, welche die räumlichen und zeitlichen Änderungen elektromagnetischer Felder miteinander und mit Ladungs- und Stromdichten verbinden. Die Maxwell'schen Gleichungen beruhen allein auf Erfahrungen und Messungen und sind mathematisch nicht ableitbar. Sie werden aber (sieht man von relativistischen und quantenmechanischen Effekten ab) als allgemeingültig angesehen. Je nach Anwendung geht man von einer Formulierung der Gleichungen in differentieller (Gl. 1-4) oder integraler Form (Gl. 1a-4a) aus. Dazu kommen noch 3 Materialgleichungen (Gl. 5-7).

$$\begin{aligned} \text{rot } E &= -\frac{\partial B}{\partial t} & (1) & \quad \int_C E \, ds = \iint_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dA & (1a) \\ \text{rot } H &= j + \frac{\partial D}{\partial t} & (2) & \quad \int_C H \, ds = \iint_A \left(j + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dA & (2a) \\ \text{div } D &= \rho & (3) & \quad \oiint_A D \cdot dA = \iiint_V \rho \, dV & (3a) \\ \text{div } B &= 0 & (4) & \quad \oiint_A B \cdot dA = 0 & (4a) \\ D &= \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E & (5) & \\ B &= \mu_0 \cdot \mu \cdot H & (6) & \\ j &= \sigma \cdot E & (7) & \end{aligned}$$

H magnetische Feldstärke

σ elektrische Leitfähigkeit

E elektrische Feldstärke

ϵ_0 Dielektrizität des freien Raums

D elektrische Flussdichte

μ_0 Permeabilität des freien Raums

B magnetische Flussdichte

j Leitungsstromdichte

ρ Raumladungsdichte

Gl. 1 bzw. 1a stellt das Faraday'sche Induktionsgesetz dar, Gl. 2 bzw. 2a das Ampere'sche Gesetz oder den Versuch von Oerstedt, ergänzt durch den von Maxwell eingeführten Verschiebungsstrom, Gl. 3 bzw. 3a das Coulomb'sche Gesetz, Gl. 4 bzw. 4a das Nichtvorhandensein magnetischer Ladungen, was wiederum bedeutet: es gibt nur magnetische Dipole und keine magnetischen Ströme. Gl. 5 und 6 sind Materialgleichungen, Gl. 7 ist das Ohm'sche Gesetz.

Nur für ganz wenige Differentialgleichungen gibt es vorgegebene Lösungsverfahren. Im allgemeinen müssen die Lösungen oder der Lösungsweg „geraten“ werden. Umgekehrt ist es einfacher: Messen wir den Speisestrom unseres Yagi aus Abb. 1 und die elektrischen und magnetischen Feldstärken im Raum, dann müssen sie (wenn wir richtig gemessen haben) die Maxwell'schen Gleichungen befriedigen.

In den vorzunehmenden Berechnungen zur Lösung des Problems wird aus rechentechnischen Gründen oft nicht direkt mit den Feldstärken E und H gerechnet, sondern mit übergeordneten Potentialfunktionen. Diese Funktionen sind das elektrische und skalare Potential ϕ und das

magnetische Vektorpotential A . Der spezielle Vorteil ist, dass ϕ und A leichter mit den Quellen unseres Feldes (also mit Strömen und Ladungen) in Verbindung gebracht werden können.

Wenden wir uns nun den Randbedingungen zu, unter denen wir eine Lösung suchen. Die einfachste Randbedingung ist die Zeitabhängigkeit unseres eingespeisten Stromes und aller daraus resultierende Ströme und Felder. Nachdem wir keine Splatter oder Tastclicks produzieren, können wir von einer Sinusschwingung, im physikalisch-mathematischen Sprachgebrauch von einer harmonischen Schwingung ausgehen. Ferner kann man für die Ausbreitung innerhalb der Antenne einen freien Raum annehmen. Damit sehen unsere Ausgangsgleichungen nun schon viel freundlicher aus. Es sind die auf Helmholtz zurückgehenden (Helmholtz-) Gleichungen

Two handwritten equations are shown on a light background. Equation (10) is $\Delta A + k^2 \cdot A = \mu \cdot j$. Equation (11) is $\Delta \phi + k^2 \cdot \phi = -\rho / \epsilon$.

In den Gleichungen ist k die Wellenzahl, $k = 2\pi/\lambda$, wobei λ die Wellenlänge ist

Aus den Helmholtz- Gleichungen lässt sich E und B , bzw. H bestimmen:

Two handwritten equations are shown on a light background. Equation (8) is $B = \text{rot } A$. Equation (9) is $E = -\text{grad } \phi - \frac{\partial A}{\partial t}$.

Anwendung

Wenden wir nun diese Beziehung auf unsere Yagi Antenne an.

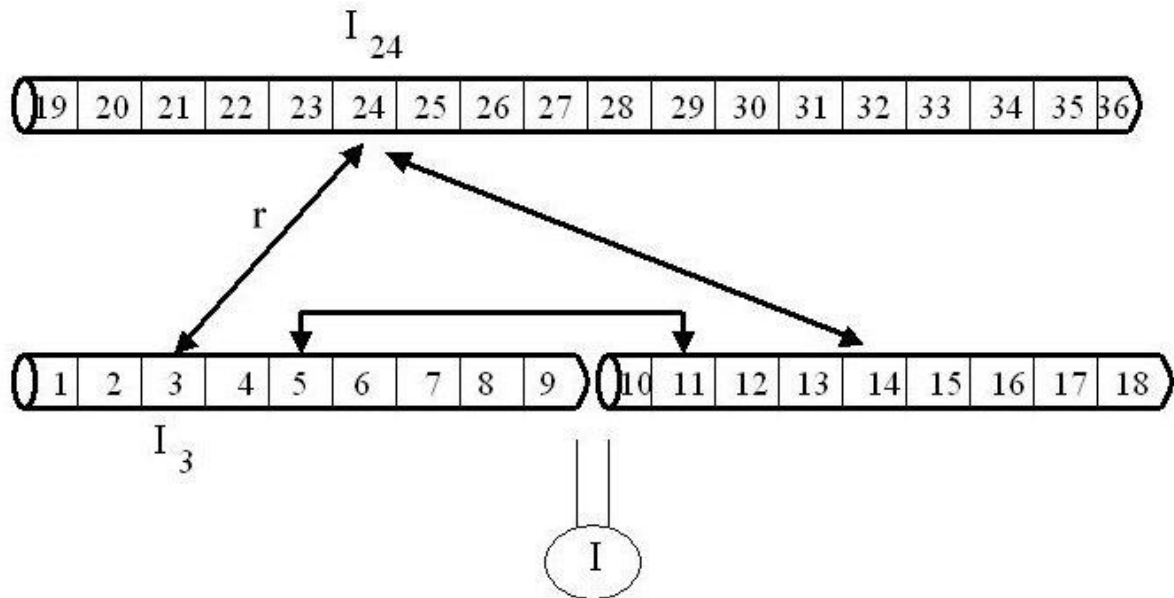


Abb. 2: Aufteilung der Antenne aus Abb. 1 in 36 Segmente (Diskretisierung).

Die Antenne wird in einzelne Segmente aufgeteilt (in Abb. 2 sind es 36). Jedem Segment wird nun ein bestimmter Stromwert zugeordnet. Dies kann ein einzelner numerischer Wert sein, was den Verlauf des Antennenstroms treppenförmig nachbildet. Eine bessere Annäherung erzielt man z.B. mit den einzelnen Segmenten überlappenden dreiecksförmigen Funktionen oder, wie in Abb. 3 dargestellt, mit sinusförmigen Teilstücken. Die Wirkung der Antenne als Ganzes kann durch lineare Superposition der Wirkung der einzelnen Segmente dargestellt werden. Von unserem Yagi wissen wir, dass nicht nur der Strahler das parasitäre Element erregt, sondern dass auch das parasitäre Element auf den Strahler zurück wirkt. Für die Optimierung der Antenne bedeutet dies in der Praxis eine sukzessive Approximation über veränderte Elementlängen.

Die Rechnung beschreitet folgenden Weg:

Greifen wir z.B. Segment 3 heraus. Dieses Stromelement erzeugt, wie in allen anderen Segmenten, so auch in Segment 24 ein magnetisches Vektorpotential A . Dieses Vektorpotential folgt aus den Gl. 8 – 11 und wird in der Form von Gl. 12 dargestellt (für eine ausführlichere Ableitung siehe [5] oder [6])

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \mathbf{j} \cdot \underbrace{\frac{e^{-ikr}}{r}}_{\text{GREEN'sche Funktion des leeren Raums}} dV \quad (12)$$

$k = 2\pi/\lambda$
 λ : Wellenlänge

(zu integrieren ist über das Volumen des herausgegriffenen zylinderförmigen Segments)

Segment 24 beeinflusst wirkt wiederum auf Segment 3 zurück, usw.. Es gibt kein Segment, was in seinem Stromfluss nicht mit einem anderen Segment in Wechselwirkung steht. Diese Wechselwirkung zwischen den einzelnen Segmenten wird durch die Gl. 12 beschrieben. Wie sich die einzelnen Segmente gegenseitig beeinflussen hängt vom Strom ab mit dem sie belastet sind und vom (vektoriellen) Abstand zwischen den Segmenten.

Aus der Praxis wissen wir, dass sobald an dem als Beispiel herangezogenen Yagi ein Speisestrom eingeschaltet wird, sich nach kurzer Zeit ein stationärer Zustand in der Stromverteilung der Elemente einstellt. In der diskretisierten Antenne hat dann jedes Segment den Stromwert, „den es verdient“. Nach was richtet sich die Verteilung? Sie erfolgt so, dass die tangential Komponente der elektrischen Feldstärke auf den (elektrisch leitenden) Antennenelementen Null wird. (D.h., die elektrischen Feldstärkelinien stehen senkrecht auf den Leitern). Dies ist die wesentliche Randbedingung für die Rechnung.

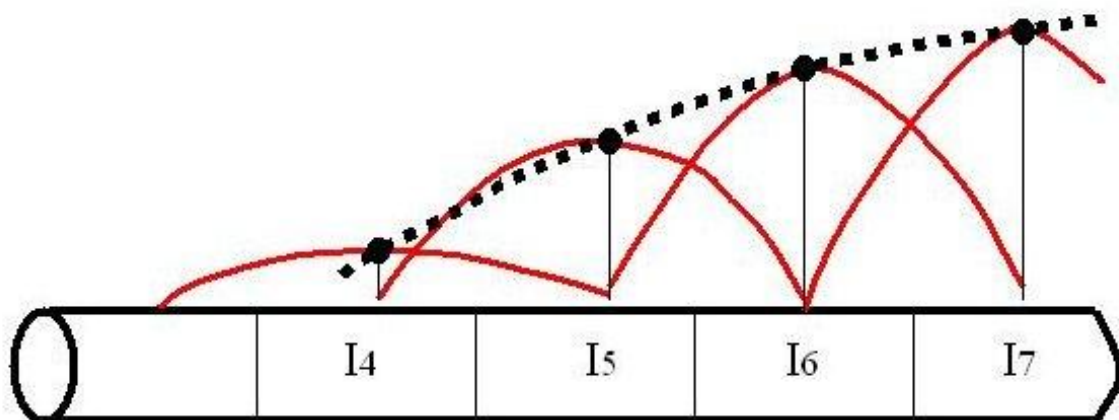


Abb. 3: Annäherung des Stromverlaufs auf der Antenne durch stückweise sinusförmige Funktionen

Momentenverfahren

Nun wird das Momentenverfahren zur Lösung der Integralgleichungen eingesetzt. Der noch unbekannte Stromverlauf auf der Antenne wird durch eine Summe über die beschriebenen Funktionen (Basis-Funktionen genannt) dargestellt. Die Koeffizienten in den Basis-Funktionen sind ebenfalls unbestimmt. Nun werden sogenannte Test-Funktionen angenommen. Sie gehen (über ähnliche oder identische Funktionen wie die Basis-Funktionen) von einem angenommenen Verlauf der Ströme auf den Antennenelementen aus. Die Stromverteilung ist dann eine Lösung für die Antenne, wenn die Tangentialkomponente des elektrischen Feldes (wie wir schon wissen) auf den Leitern verschwindet. Ausnahme ist bei Sendeantennen der Speisepunkt, bei Empfangsantennen das vom weit entfernten Sender die Antenne überdeckende elektrische Feld. Der Weg führt nun zur Lösung eines linearen Gleichungssystems. Die Matrix hat die Form von Gl. 13

$$\begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1i} & \dots & z_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{h1} & \dots & z_{hi} & \dots & z_{hN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{N1} & \dots & z_{Ni} & \dots & z_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_h \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} \quad (13)$$

$I_1 \dots I_N$ sind die unbekanntes Ströme auf den einzelnen Segmente, $U_1 \dots U_N$ die dazugehörigen Spannungen. Die Matrix mit den Gliedern $Z_{11} \dots Z_{NN}$ stellt die Verbindung zwischen Spannungen und Strömen her. Gl. 13 hat Ähnlichkeit mit dem Ohm'schen Gesetz. Die Spannungen entlang den einzelnen Segmenten sind (bei dem elektrisch ideal angenommenen Leiter), außer am Einspeisepunkt, Null.

Die Gleichung kann mit bekannten (Näherungs-)Verfahren aus der Mathematik (Gauss u.a.) nach den unbekanntes Strömen aufgelöst werden. (Die Matrix steht im Nenner bei der Auflösung nach den Strömen).

Mit der jetzt bekannten Stromverteilung auf der Antenne ist es weitergehend nicht schwer, das Strahlungsfeld der Antenne und weitere Antennengrößen zu berechnen. Jedes Segment kann als Mini-Strahler angesehen werden. Das Nah- und Fernfeld ergibt sich aus phasenrichtiger Aufsummierung über die Einzelsegmente.

Welche Fehler können bei den Berechnungen auftreten? Im klassischen NEC wird nur ein axial verlaufender Strom durch die Antennenstäbe angenommen. Ringförmige Ströme um die zylindrisch angenommenen Leiter werden ausgeschlossen. Für gestreckte Antennenstäbe ist diese Annahme zulässig, vorausgesetzt der Abstand der Drähte oder Stäbe beträgt mindestens 5...10 mal dem Durchmesser der Leiter. Dies muss insbesondere bei der Modellierung von Speiseleitungen (Parallelleitungen) berücksichtigt werden. Kritisch sind auch abgelenkte Leiter, wie sie bei Quad- oder Deltaloop- Antennen auftreten. Die Aufsummation der gewählten Basisfunktionen soll den Stromverlauf auf der Antenne möglichst getreu wiedergeben. Störend kann sich hier auswirken, wenn Leiter mit verschiedenen Durchmesser zusammen stoßen. (Manche NEC Programme enthalten eine „tapering“ Funktion für einen gleitenden Übergang).

Die Eingangsimpedanz und der Stromverlauf auf der Antenne sind eine gute Kontrolle zur Qualität der Modellierung. Änderungen in der Segmentierung sollten sich möglichst wenig auf diese Größen auswirken. Symmetrien in der Antennengeometrie sollten auch weitgehend mit Symmetrien in der Stromverteilung auf der Antenne und im Abstrahldiagramm übereinstimmen.

Literatur

[1] R.F. Harrington (1967): Matrix Methods for Field Problems, Proc. IEEE, Vol. 55, p. 136-149.

[2] G.J. Burke, A.J. Poggio (1981): Numerical Electromagnetics Code (NEC), Method of Moments, National Tech. Inform. Serv., Springfield, Va. (im Internet als Abdruck vorhanden)

[3] EZNEC by Roy Lewallen, W7EL. (ausführliche Information im Internet, Preis ca. 100 EUR)

[4] 4NEC2 by Arie Voors. Frei zum Herunterladen im Internet. Ausgezeichnete deutsche Dokumentation verfügbar (Internet).

[5] F. Gustrau, D. Manteuffel (2006): EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems. Springer, 276 S.

[6] A. Schroth, V. Stein (1985): Moderne numerische Verfahren zur Lösung von Antennen- und Streuproblemen. R. Oldenbourg Verlag, 525 S.