

# Vereinfachte Nahfeldberechnungen bei Felderantennen für den Mobilfunk

Dr.-Ing. Roland Gabriel, Kathrein-Werke KG Rosenheim  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Liesenkötter, Fachhochschule Augsburg

## 1. Einleitung

Zunehmend werden für Standorte von Basisstationsantennen von den Mobilfunkbetreibern Nachweise zur elektromagnetischen Umweltverträglichkeit bzw. zur Einhaltung der vorgeschriebenen elektromagnetischen Grenzwerte gefordert. So wird in [1] als maximale Feldstärke für Wohngebiete ein Effektivwert von ca. 40 V/m bei 0.9 GHz zugelassen. Die Bestimmung der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke oder der Leistungsdichte kann bei geringen Abständen zur Antenne nur durch eine aufwendige Berechnung mit Feldberechnungsprogrammen wie z.B. NEC, FEKO oder MAFIA genügend genau erfolgen. Eine Abschätzung mit einfachen Fernfeldgleichungen führt in der Nähe der Antenne zu unsinnigen Werten, da hierbei von einer punktförmigen Quelle ausgegangen wird. Solche Rechenergebnisse gelten nur für Abstände größer

$$r_{\min} = 2 l_{\max}^2 / \lambda \quad \text{mit } l_{\max} = \text{Antennenlänge.}$$

Bei den bekannten Feldberechnungsprogrammen sind die recht aufwendige Modellierung der Antenne und relativ lange Rechenzeiten nachteilig. Fehler bei der Simulation mit diesen Programmen entstehen vorwiegend durch die Ungenauigkeiten der Modellierung (Diskretisierung und Materialparameter). Die Berechnung selbst jedoch liefert eine sehr exakte Feldverteilung für das jeweilige Modell.

Im Vergleich dazu sind Messungen der Feldgrößen sicher mit höheren Ungenauigkeiten verbunden (Halterungen, Rückwirkung der Meßsonde in unmittelbarer Nähe der Strahlungsquelle).

Die breite Anwendung genauer Simulationen wird zusätzlich erschwert durch fehlende Standardisierung der Modelle, die Vielfalt der Programme und die zum Teil fehlende Software bei Netzplanern und -betreibern.

Es wurde deshalb die Berechnung nach einem einfacheren Prinzip untersucht, mit der die Nahfeldverteilung mit einer für diesen Einsatz ausreichenden Genauigkeit ermittelt werden kann.

## 2. Superposition aus Einzelstrahlern

### 2.1. Prinzip der Nahfeldsuperposition

Zur Ermittlung des Feldstärkevektors in einem beliebigen Aufpunkt benötigt man die Stromverteilung auf den vorhandenen Metallflächen in Abhängigkeit der eingespeisten (angeregten) Ströme, welche nach verschiedenen Vorgehensweisen berechnet werden können. Bei den typischen Antennenbauformen für Mobilfunk-Basisstationen können Annahmen getroffen werden, die eine einfachere Berechnung der Nahfeldverteilung ohne genaue Ermittlung der gesamten Stromverteilung und der damit verbundenen Modellierung ermöglichen:

- Das Strahlungsdiagramm der Antenne sei bekannt. Die Antenne lasse sich weiterhin in eine Anzahl von Modulen zerlegen, welche als beschreibbare Einzelantennen definiert werden können und jeweils ein primär gespeistes Strahlerelement besitzen (Felderanordnung).

- Die geometrische Anordnung der Module sei näherungsweise bekannt (z.B. gleichmäßige Verteilung).
- Die Phase und Amplitude der primär gespeisten Strahlerelemente sei vorgegeben. Alternativ kann eine Rückrechnung aus dem bekannten Strahlungsdiagramm erfolgen.
- Die Strahlungsdiagramme der Einzelmodule und der Gewinn derselben seien in etwa bekannt.

Die Phasenverschiebung zwischen der elektrischen und magnetischen Feldstärke ist bei einem Abstand von etwa  $r > 2\lambda$  zu vernachlässigen, hierbei gilt für das Einzelmodul bereits in guter Näherung:

$$Z_{F0} = E/H = 377 \Omega, \text{ vgl. } /2/.$$

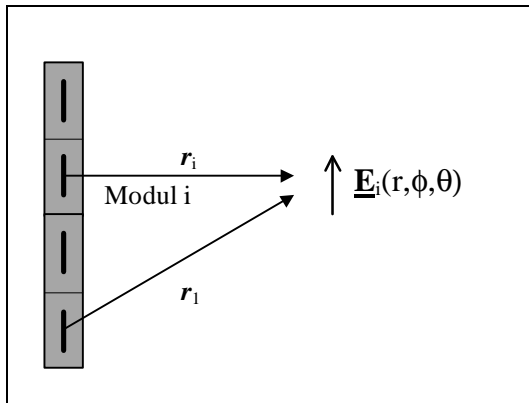


Bild 1: Felderanordnung

Mit diesen Voraussetzungen kann dem jeweiligen i-ten Einzelmodul ein komplexes Strahlungsdiagramm

$$\underline{C}_i(\varphi, \nu) = \underline{E}(\varphi, \nu) / |E_{\max}|$$

zugeordnet werden, wobei die komplexe Größe  $\underline{C}_i$  die relative Phase der Laufzeitdifferenz zu einem Punktphasenzentrum beinhaltet. Das i-te Modul erzeugt somit bei einem beliebigen Aufpunkt und bekannter Eingangsleistung des Primärstrahlers i die Strahlungsdichte

$$S_i(r, \varphi, \theta) = P_{si} |\underline{C}_i|^2(\varphi, \nu) / 4\pi r^2$$

bzw. die elektrische Feldstärke

$$\underline{E}_i(r, \varphi, \theta) = \underline{I}_i \underline{C}_i(\varphi, \nu) / r * \{ Z_{F0} \text{Re}\{\underline{Z}_i\} / 4\pi \}^{0.5} e^{-jkr}$$

Die Feldstärke der Gesamtantenne berechnet sich nun über die Summe der Einzelmodule:

$$\underline{E}_{\text{ges}}(r) = \sum_{i=1}^n \{ \underline{I}_i \underline{C}_i(\varphi(r_i), \nu(r_i)) / r_i * \{ Z_{F0} \text{Re}\{\underline{Z}_i\} / 4\pi \}^{0.5} e^{-jkr_i} \}$$

$r_i$  ist der i-te Vektor zwischen dem i-ten Modul und dem Aufpunkt. Somit sind die Größen  $\varphi$  und  $\theta$  von dem aktuellen Vektor  $r_i$  abhängig, siehe Bild 1.

Eine weitere Vereinfachung besteht in der Annahme, daß die Einzelmodule ein Punktphasenzentrum besitzen. Dadurch wird  $\underline{C}_i$  eine skalare Größe. Ein Problem stellt aber die Gewinnung eben dieses Strahlungsdiagrammes insofern dar, daß sich ein separates Einzelmodul etwas anders verhält als mehrere zusammengeschaltete. Auch können die Randmodule ein anderes Verhalten aufweisen als die mittleren, insbesondere im Rückbereich von Richtantennen.

## 2.2. Bestimmung der Einzelstrahlungscharakteristiken

Jedem Einzelmodul wird ein Strahlungsdiagramm zugeordnet. Einerseits besteht die Möglichkeit, das Einzelmodul separat zu vermessen. Dabei sollte sich dieses Modul aber in der Gesamtanordnung befinden. Eine Unsicherheit allerdings stellt hierbei die Verkopplung zu den benachbarten Modulen dar. Bei großer Verkopplung tritt das Problem auf, daß die benachbarten Module bereits mit erregt werden, so daß die Messung des separaten Einzemodules kompliziert wird. Hierzu wäre eine gesonderte Betrachtung nötig.

Alternativ zur Messung haben sich zwei Verfahren bewährt:

- Modellrechnung für das einzelgespeiste Modul in der Gesamtanordnung. Hierbei

können unter Umständen die Diagramme einzeln berechnet werden.

- Einsatz bekannter typischer Strahlungsdiagramme für die Einzelmodule. Die Überprüfung bzw. Nachstimmung der Modellierung erfolgt bei bekannter Geometrie der Modulordnung anhand des bekannten Fernfelddiagrammes.

### 2.3. Aperturbelegung

Normalerweise ist bei der Entwicklung einer Antenne die Leistungs- und Phasen-speisung der Einzelmodule zumindest näherungsweise bekannt. Diese Vorgaben können unmittelbar im Programm „RADCALC“ verwendet werden. Aber auch hier ist eine Rücktransformation aus einem vorhandenen Fernfelddiagramm bei vorgegebener Geometrie, d.h. den Abmaßen der Antenne, sowie dem Abstand der Einzelmodule möglich. Die Rücktransformation der Fernfeldcharakteristik ergibt normalerweise eine recht genaue Lösung bezüglich der Charakteristik des Einzeldiagrammes und der Leistungs- und Phasenverteilung. Vorgeschlagene Algorithmen sind in /3/ zu finden, bevorzugt wird jedoch eine iterative Bestimmung durch Optimierung nach Ermittlung der Anfangswerte nach einem der o.g. Verfahren.

### 3. Vergleich mit Berechnungen nach der Momentenmethode

Zur Verifikation des Vorgehens wurde die Strahlung einer typischen Mobilfunk-Sendeantenne mit vierfach übereinander angeordneten vertikal polarisierten Dipol-Zwillingen (Halbwertsbreiten  $65^\circ \times 13^\circ$ ) mit zwei verschiedenen Programmen der Momentenmethode berechnet.

### 3.1 Berechnung des Fernfelds

Für die Berechnung mit dem seit langem bekannten NEC2 wurde der Reflektor als Drahtgitter aus rechteckigen Maschen mit Weiten  $< 0,1\lambda$  modelliert. Insgesamt ergab sich unter Ausnutzung einer Symmetrieebene eine Zahl von  $> 1000$  Segmenten. Bei dieser Unterteilung bewirkten unterschiedlich angenommene Drahtstärken des Gittermodells nur noch Diagrammvariationen im Nebenkeulenbereich unter  $- 25$  dB. Die regelmäßige rechteckige Drahtgitterstruktur war rein intuitiv gewählt, nach genaueren Untersuchungen über die Stromverteilungen könnte sicher eine bessere (aber ungleichmäßige) Strukturunterteilung gefunden werden.

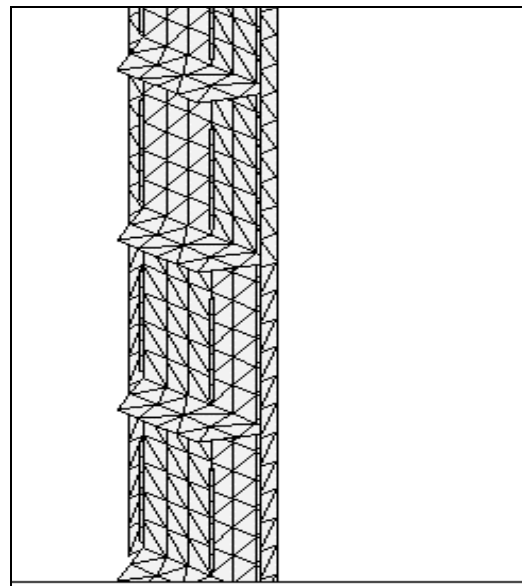


Bild 2: FEKO- Modellierung der Antenne

Die gleiche Antenne wurde auch mit FEKO /4/ berechnet. Die dabei erzeugte Modellstruktur ist in Bild 2 gezeigt.

Die Genauigkeit der Modellierung der Antenne wurde durch den Vergleich der Ergebnisse eines Fernfeld-Strahlungsdiagramms überprüft.

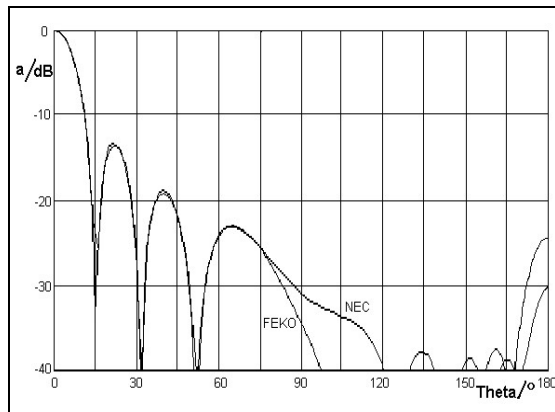


Bild 3: Vergleich der Fernfeldberechnungen (f=900 MHz)

In Bild 3 ist ein vertikaler Hauptschnitt durch die Strahlungscharakteristik dieser Antenne gezeigt. Es ist deutlich eine sehr gute Übereinstimmung bis zu Diagrammwerten von  $>25$  dB unter dem Maximum festzustellen. Die deutlichen Unterschiede im Nebenkeulenbereich  $-30 \dots -40$  dB sind wahrscheinlich auf die beim NEC nicht optimal gewählte Drahtgitterstruktur zurückzuführen.

Desweiteren wurde die Strahlung einzelner Dipolzwillinge an unterschiedlichen Positionen auf einem längeren Reflektor berechnet. Mit dieser Information konnte die Variation der Weitab-Strahlung der Module für den Einsatz im vereinfachten Superpositions-Rechenprogramm 'RADCALC' abhängig von ihrer Position in der Gruppe in ausreichendem Maße berücksichtigt werden. Hierbei zeigt sich, daß in guter Näherung mit einheitlichen Einzeldiagrammen gerechnet werden kann.

### 3.2. Genaue Berechnung des Nahfeldes

Sowohl mit NEC als auch mit FEKO wurde die Feldverteilung im Nahbereich dieser Antenne berechnet. Zum Vergleich sind die Linien konstanter Feldstärke (Isoradiolinien) dargestellt.

Abgesehen von den Bereichen niedriger Neben- und Rückwärtsstrahlung waren keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Ergebnissen festzustellen.

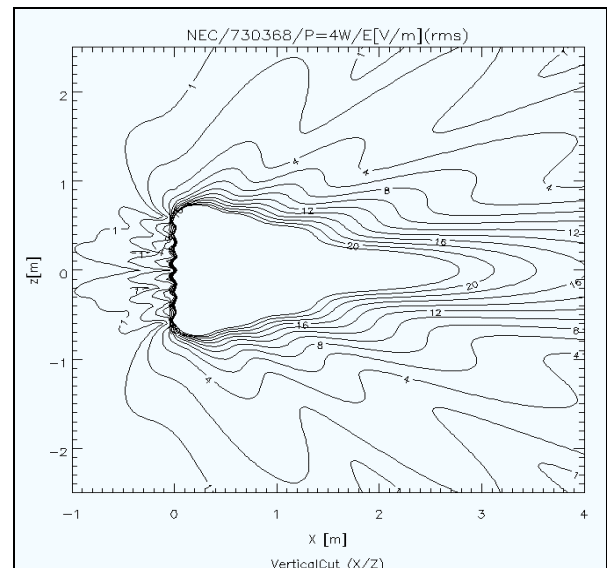


Bild 4: Nahfeld (NEC), P= 4W, E [V/m] 1,2,4...22 V/m, f= 900 MHz

Die berechneten Feldstärkeverteilungen in der Vertikalebene sind für verschiedene Programme und Modelle in Bild 4,5 und 6 dargestellt.

### 3.3 Vergleich mit RADCALC

Das Superpositionsprogramm RADCALC soll System-Planern direkt eine Aussage über die zu erwartenden Feldstärken im Nahbereich der Antenne ermöglichen. Deshalb werden seine Ergebnisse in Effektivwerten der Feldstärke (z.B. gemäß  $1/\sqrt{2}$ ) bzw. als Leistungsdichte S der Strahlung dargestellt.

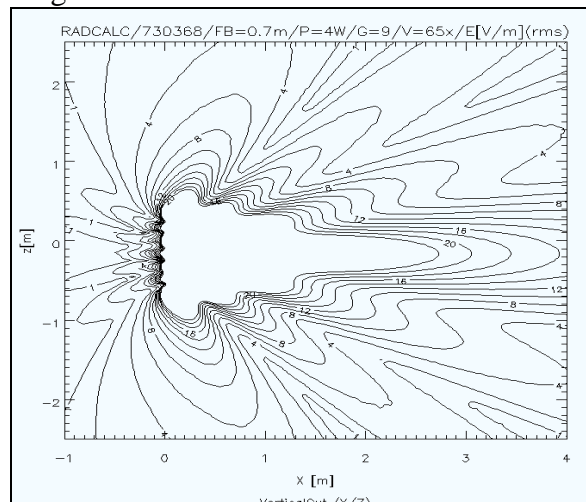


Bild 6: RADCALC-Nahfeld, Einzelmodul mit  $65^\circ$  vertikaler Halbwertsbreite

Eine Berechnung mit NEC bzw. FEKO erfordert eine Umnormierung auf Effektivwerte der berechneten Feldstärkewerte.

Beim Vergleich der Ergebnisse sind die Einflüsse unterschiedlicher Annahmen bei den Modul-Strahlungseigenschaften deutlich zu erkennen.

## 4. Modelloptimierung

Im Ergebnis der Vergleiche der verschiedenen Berechnungsmethoden wurde das gewählte Modell optimiert.

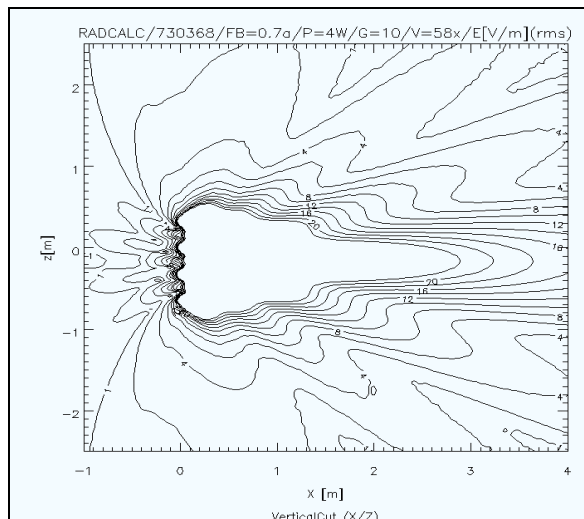


Bild 7: Nahfeldberechnung mit „RADCALC“, optimiertes Modell

Die mit RADCALC berechneten Einzelstrahlungsdiagramme ergeben eine sehr gute Übereinstimmung mit den NEC bzw. FEKO-Nahfeldrechnungen. Abweichungen im Hauptstrahlbereich zwischen NEC- und RADCALC-Rechnungen liegen unter 30% (1,5dB). Im Neben- und Rückstrahlbereich können die Abweichungen höher sein. Allerdings ist anzumerken, daß der Pegel dabei vergleichsweise gering ist und weiterhin auch andere Programme hierbei Differenzen aufweisen (vgl. 3.1.). Starke Frequenzabhängigkeiten der Nebenzipfel und der Rückwärtsstrahlung erlauben in der Praxis nur die Angabe eines mittleren Wertes.

Folgend werden die Ergebnisse und Probleme der RADCALC - Modellierung aufgeführt:

- Abweichungen der Einzelstrahlungsdiagramme wirken sich unmittelbar auf den Nebenstrahlungsbereich aus. (vgl. Bild 5 - Bild 6). Diese Abweichungen sind allerdings auch im Fernfelddiagramm sichtbar, demzufolge ist eine Kontrolle möglich.
- Eine Optimierung der Einzelstrahlungscharakteristik sowie der Phasen- und Leistungsspeisung der Einzelmodule kann durch das vorgegebene Fernfelddiagramm recht genau erfolgen.
- Für die Einzelcharakteristik eines Dipolstrahlungsmoduls bei vertikaler Modulordnung mit vertikaler Polarisation wurde eine typische vertikale Halbwertsbreite von ca.  $55^\circ$  ermittelt.
- Der aus der Überlagerung der Einzelmodule ermittelte Gewinn der Gesamtantenne führt bei zu eng benachbarten Modulen trotz sehr guter Übereinstimmung der berechneten Nah- und Fernfeldverteilung zu falschen Gewinnwerten der Gesamtantenne. Eine Korrektur desselben mit dem bekannten Gewinn ist demzufolge angebracht. Die Ursache ist in einer Überlappung der Wirkflächen der Module zu suchen. So lassen sich bspw. die  $65^\circ$ -Antennen aus Dipolzwillingen mit  $90^\circ$  horizontaler Halbwertsbreite nachbilden, wobei man jedoch ohne Korrektur einen zu hohen Gewinn der Gesamtantenne erhält.
- Die multiplikative Verknüpfung von Vertikal- und Horizontaldiagrammen der Einzelmodule ist eine gute Näherung bei entsprechend kleinen Modulen. (Die exakte Rechnung würde ein zweidimensionales Strahlungsdiagramm der Einzelmodule erfordern.)

## 5. Zusammenfassung

Das Programm RADCALC kann die elektrische und magnetische Feldverteilung und die Leistungsdichte im Nahbereich von Basisstationsantennen des Mobilfunks berechnen. Aus den üblichen Herstellerangaben können die Antennen mit standardisierten Modulen nachgebildet werden, wodurch sich ein einfaches Programm mit vernachlässigbarer Rechenzeit ergibt. Trotz der vereinfachten Modellierung zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Feldberechnungsprogramme ab einem Mindestabstand von nur ca. 2..3 Wellenlängen, welcher durch die Modulgröße vorgegeben ist. Beliebige Schnitte im Raum sind dabei möglich. RADCALC kann wegen der einfachen Modellierung leicht von Netzplanern und -betreibern angewandt werden, um die Einhaltung von vorgeschriebenen elektromagnetischen Grenzwerten nachzuweisen. Eine gute Kontrollmöglichkeit der Nachbildung erhält man aus dem Vergleich mit einer bekannten Fernfeldrichtcharakteristik.

## Literaturverzeichnis

- /1/ DIN VDE 0848 Teil 1..4, „Sicherheit in elektromagnetischen Feldern“, Entwurf, VDE-Verlag Berlin 1991,1992
- /2/ Heilmann,H., „Antennen“, Band 1, Bibliographisches Institut, Mannheim 1970. S. 23,24
- /3/ Heilmann,H., „Antennen“, Band 2, Bibliographisches Institut, Mannheim 1970. S. 58 ff.
- /4/ Jakobus,U., Programm „FEKO“, Universität Stuttgart, Institut für HF-Technik, 1996

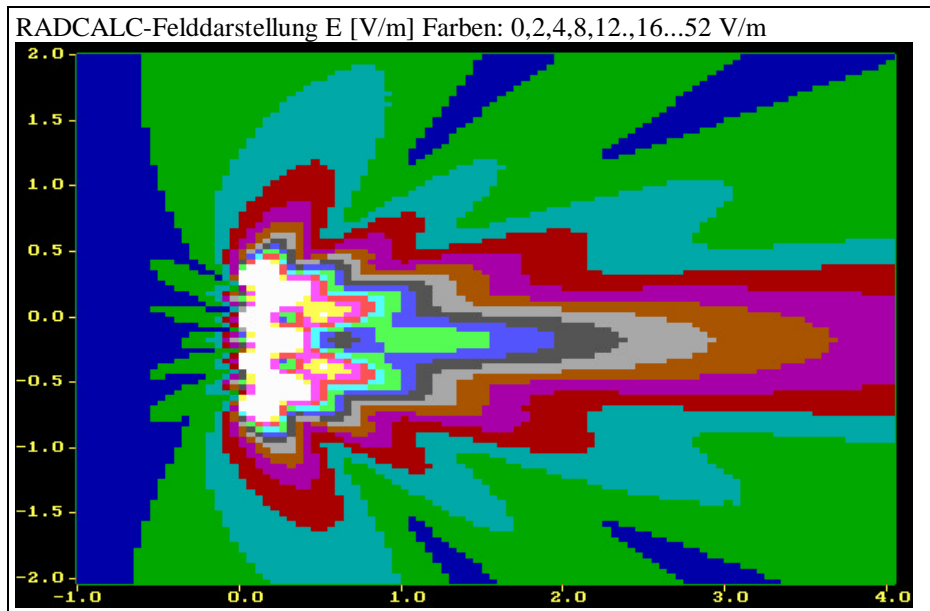


Bild 7: RADCALC - Felddarstellung, Einzelmodule 4x 65°x65°