

# Antennensimulationen in CST - Bericht hf1

Simon Zoller, Thomas Frei

Windisch, 9. Februar 2019

<b>Universität</b>	Fachhochschule Nordwestschweiz
<b>Studiengang</b>	Elektro- und Informationstechnik
<b>Autor</b>	Simon Zoller, Thomas Frei
<b>Betreuer</b>	Christoph Wildfeuer und Peter Niklaus
<b>Version</b>	1.0

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Hertzscher Dipol</b>	<b>2</b>
2.1 Theorie . . . . .	2
2.2 Richtdiagramm . . . . .	3
2.3 Simulation . . . . .	6
<b>3 Linearantennen</b>	<b>7</b>
3.1 Theorie . . . . .	7
3.2 Simulation . . . . .	9
<b>4 Gruppenantennen</b>	<b>15</b>
4.1 Querstrahler . . . . .	16
4.2 Simulation . . . . .	16
<b>5 Kleeblattantenne</b>	<b>19</b>
5.1 Theorie . . . . .	19
5.2 Simulation . . . . .	20
<b>6 Fazit</b>	<b>21</b>
<b>Literatur</b>	<b>22</b>
<b>7 Appendix</b>	<b>23</b>

## 1 Einleitung

Ein grosses Thema der Hochfrequenztechnik sind Antennen. Generell können Antennen als Leiter angesehen werden, welche identisch zur Leitungstheorie gelten. Jedoch gibt es viele verschiedene Ausführungen welche sich alle unterschiedlich verhalten. Während des Unterrichtes wurden keine Antennen angeschaut, weshalb sich mit diesem Bericht die Möglichkeit angeboten hat, diesen Teilbereich aufzuarbeiten. Hierfür wurden im Simulationsprogramm CST Messungen ausgewählter Antennen durchgeführt, welche sich vor allem auf die Direktivität der Antennen beziehen. Als Abschluss wurde noch eine Kleeblatt Antenne modelliert, mit welcher am Institut gearbeitet wird. Zu jeder Antenne wurde zuerst die Theorie behandelt und anschliessend die entsprechenden Simulationen durchgeführt. Die Theorie wurde nach dem Buch von K. Kark aufgearbeitet [1].

## 2 Hertzschter Dipol

Als erstes Thema wird der Hertzsche Dipol beschrieben, welcher das Modell der Antenne durch seine kurze Länge vereinfacht.

### 2.1 Theorie

Der Hertzsche Dipol lässt sich als offener Schwingkreis interpretieren [2]. Seine Entstehung kann schematisch als Deformation eines geschlossenen Schwingkreises, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, beschrieben werden. Die Frequenz dieses Schwingkreises lautet:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.1)$$

Da der Hertzsche Dipol eine hochfrequente elektromagnetische Schwingung erzeugen soll, muss die Induktivität  $L$  und die Kapazität  $C$  klein sein. Sie lassen sich wie folgt berechnen:

$$L = \mu_0 \mu_r n^2 \frac{A}{l} \quad (2.2)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

Um die Induktivität der Spule zu minimieren, muss die Permeabilitätszahl, die Windungszahl  $n$  und die Spulenfläche  $A$  möglichst klein und die Spulenlänge  $l$  möglichst gross sein. Die Permeabilitätszahl kann verkleinert werden, indem eine Luftspule verwendet wird.

Die Kapazität des Kondensators wird verkleinert mittels einer minimalen Dielektrizitätszahl und einer kleinen Plattenfläche  $A$  sowie durch einen grossen Plattenabstand  $d$ . Um die Dielektrizitätszahl zu senken wird das Dielektrikum Luft verwendet.

In der Abbildung 2.1 ist die Minimierung der Induktivität und der Kapazität symbolisch dargestellt. So entsteht aus einem geschlossenen Schwingkreis ein offener Schwingkreis. Das Resultat ist ein langer, dünner Stab. Die Frequenz des Schwingkreises kann nun nicht mehr über die Induktivität und der Kapazität verändert werden. Der Hertzsche Dipol lässt sich nur noch über eine Längenänderung anpassen.

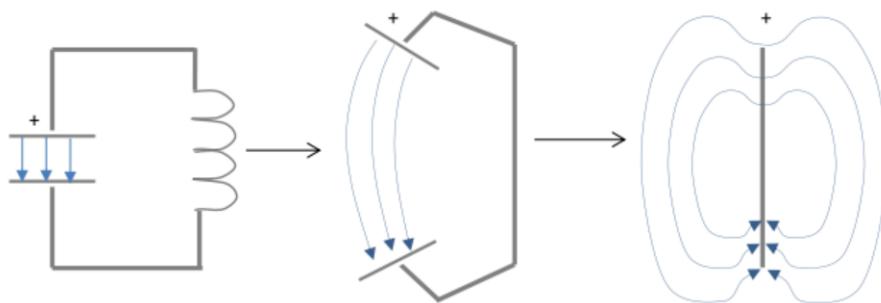
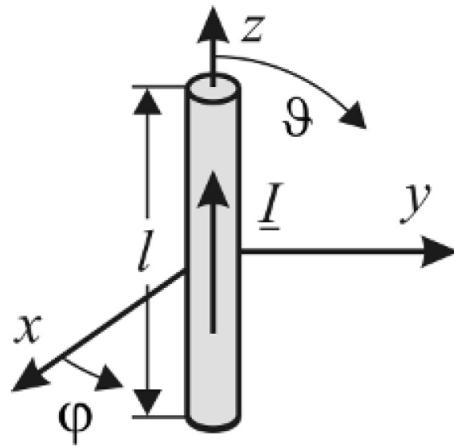


Abbildung 2.1: Entstehung eines Hertzschen Dipols [2].

Eine Dipol Antenne kann als kurzer Linearstrahler beschrieben werden, wobei dessen Länge  $l \ll \lambda_0/4$  beträgt.  $\lambda_0$  ist dabei die Wellenlänge, welche durch das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit zur Signalfrequenz  $c_0/f$  beschrieben wird.



**Abbildung 2.2:** Hertzscher Dipol im Koordinatensystem.

Ein solcher Strahler ist in Abbildung 2.2 zu sehen, wobei  $\underline{I}$  der komplexe Strom einer Sinusschwingung darstellt, welche konstant über die gesamte Länge schwingt.  $\varphi$  stellt den Winkel dar, welcher um die z-Achse rotiert und über die x- und y-Achse aufgespannt ist.  $\vartheta$  hingegen rotiert um die x-Achse und wird über die y- und z-Achse aufgespannt. Für die Kugelkoordinaten bedeutet dies, dass mit den Restriktionen

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (2.4)$$

$$0 \leq \vartheta \leq \pi \quad (2.5)$$

der gesamte Bereich des Koordinatensystems abgedeckt ist. Das durch den Strom induzierte Magnetfeld kann mit

$$\underline{H}_0 = j\pi \frac{\underline{I}l}{\lambda_0^2} \quad (2.6)$$

beschrieben werden, was zwei Formeln für das magnetische und elektrische Feld liefert:

$$\underline{H}_\varphi = \underline{H}_0 \sin \vartheta \frac{e^{-jk_0 r}}{k_0 r} \quad (2.7)$$

$$\underline{E}_\vartheta = Z_0 \underline{H}_\varphi = Z_0 \underline{H}_0 \sin \vartheta \frac{e^{-jk_0 r}}{k_0 r}. \quad (2.8)$$

Hierbei beschreibt  $r$  die Distanz des Punktes zum Ursprung und  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\eta_0} = c_0/\omega$  die Wellenzahl im Vakuum. Somit ist die komplexe Exponentialfunktion die Ausbreitung der Welle, was mit der Theorie der Wellenleitern übereinstimmt. Im Nenner ist das Abklingen des Sinus zu erkennen, welches abhängig von der Distanz zum Ursprung und der Wellenzahl ist.

## 2.2 Richtdiagramm

Ein wichtiges Diagramm für die Analyse von Antennen ist das Richtdiagramm. Mit diesem kann die Direktivität einer Antenne dargestellt werden, welche mitteilt, in welche Richtung wie viel der Leistung der Antenne abgestrahlt wird. Diese Analyse geschieht im Fernfeld, was bedeutet

dass die Annahme  $r \rightarrow \infty$  getroffen wird. Somit kann verhindert werden, dass eine Antenne in eine unerwünschte Richtung Leistung abgibt und somit eine andere Antenne stören könnte. Daher wird die Feldstärke einer Antenne in Abhängigkeit der Raumrichtung beschreiben, welche mit den Kugelkoordinaten  $\vartheta$  und  $\varphi$  angegeben wird.

Für das Richtdiagramm wird die komplexe elektrische Feldstärke in den Kugelkoordinaten auf dessen maximale Feldstärke normiert, wobei sich dadurch ein Wert zwischen 0 und 1 einstellt (Simulationsprogramme können eine andere Normierung vornehmen, worauf acht genommen werden sollte). Dies ergibt die auf den Maximalwert normierte Winkelverteilung des elektrischen Feldes. Diese Kenngrösse wird als Richtcharakteristik bezeichnet:

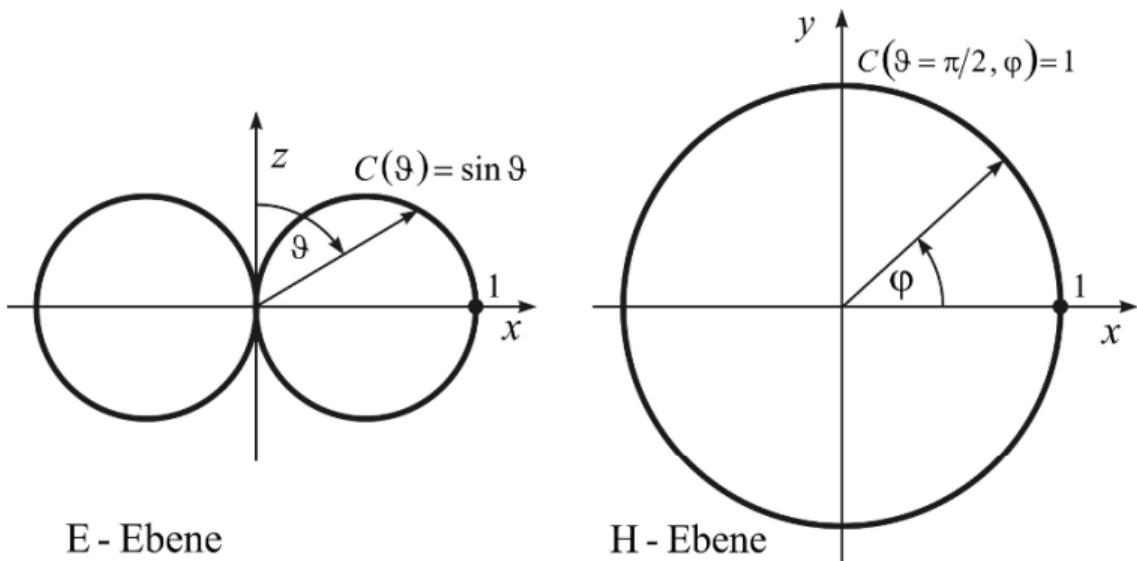
$$C(\vartheta, \varphi) = \frac{|\underline{E}(\vartheta, \varphi)|}{|\underline{E}(\vartheta, \varphi)|_{\max}}. \quad (2.9)$$

Als Beispiel wird der Hertzsche Dipol aus dem Abschnitt 2.1 betrachtet. Dessen elektrische Feldstärke ist in Formel 2.8 beschrieben, wobei durch den Sinus dessen Maximalwert direkt bestimmt werden kann. Somit ergibt sich für die Richtcharakteristik:

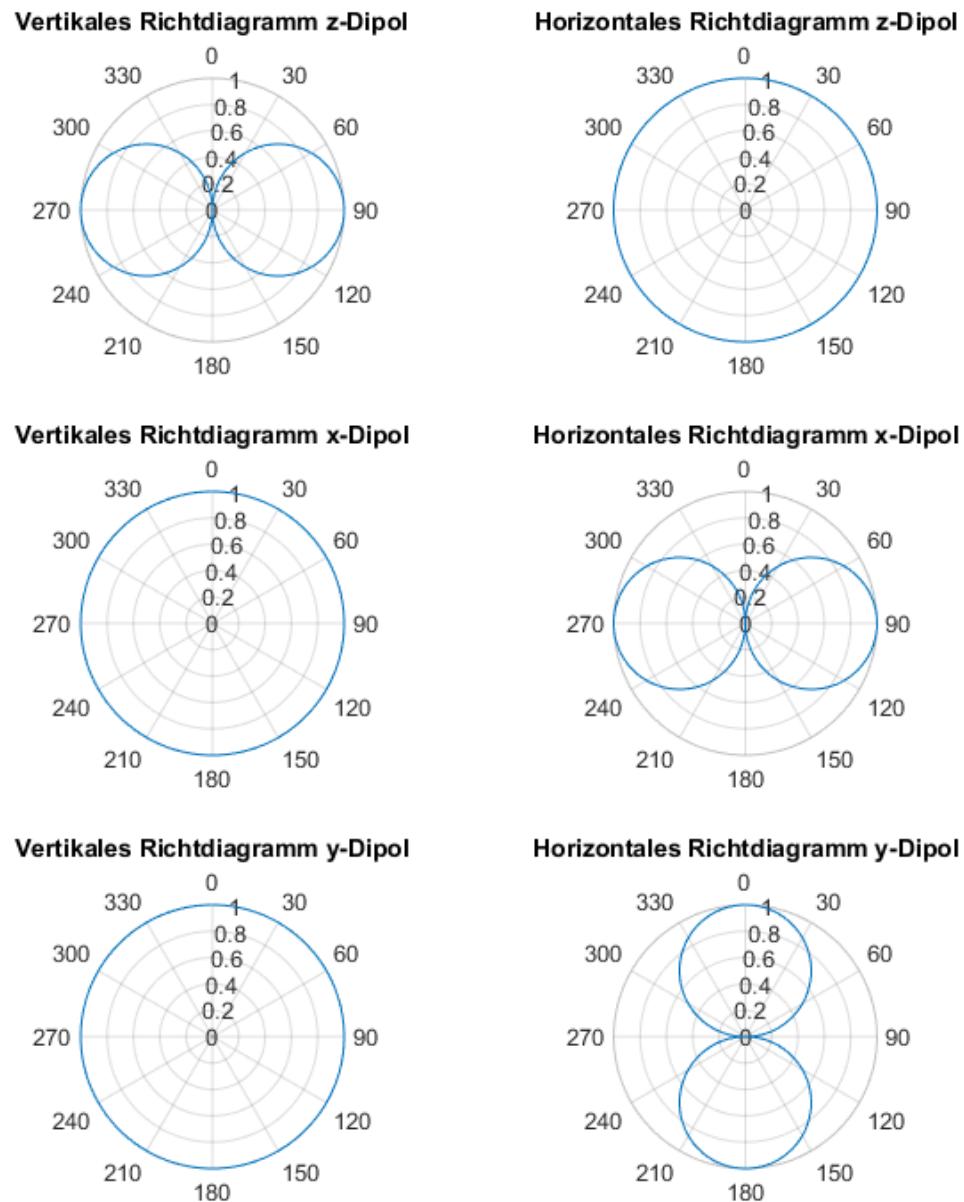
$$C(\vartheta, \varphi) = \frac{|\underline{E}(\vartheta, \varphi)|}{|\underline{E}(\vartheta, \varphi)|_{\max}} = \frac{\frac{Z_0|H_0||\sin \vartheta|}{k_0 r}}{\frac{Z_0|H_0|}{k_0 r}} = \sin \vartheta. \quad (2.10)$$

Aus Formel 2.10 ist herauszulesen, dass an der Stellen für  $\vartheta$  gleich Null oder  $\pi$  eine Nullstelle ist, das Maximum an der Stelle  $\pi/2$  mit dem normierten Wert 1 erreicht wird und bei  $\pi/4$  der Wert  $1/\sqrt{2}$  anliegt.

Zur Verifikation wurde zuerst ein MATLAB-Code erstellt, welcher die Polarkoordinaten darstellen soll (siehe Appendix). Zu erwarten ist dabei ein identischer Plot zu dem im Buch von K. Kark auf Seite 162, welcher in Abbildung 2.3 zu sehen ist [1].



**Abbildung 2.3:** Vertikal- und Horizontalschnitt eines Hertzschen Dipole.



**Abbildung 2.4:** Simulationen des Hertzschen Dipoles mit der Anordnung in allen drei verschiedenen Achsenrichtungen.

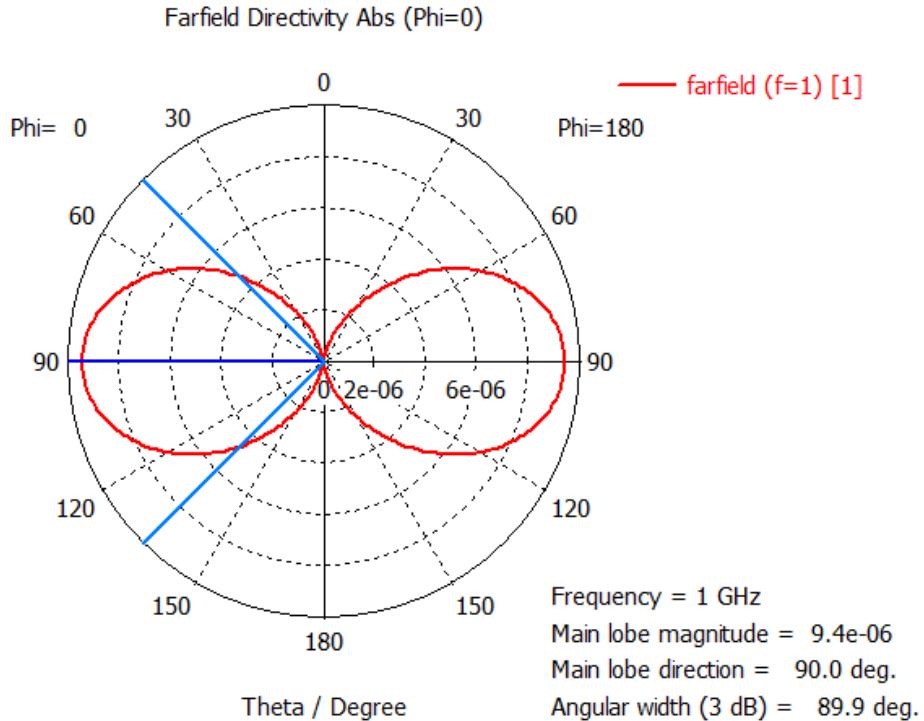
Das Resultat ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Die Werte stimmen mit den Annahmen und der erwarteten Figur 2.3 überein. Zu beachten ist jedoch, dass nur die Hälfte des Kreises ersichtlich wäre, wenn wie in Formel 2.5 definiert  $\vartheta$  nur über den halben Bereich gewählt werden würde. Zur einfacheren Darstellung wurde hier aber  $\vartheta$  von  $0 \dots \pi$  gewählt. Bei der Berechnung wird zwischen dem vertikalen und horizontalen Richtdiagramm unterschieden, wobei für das vertikale Diagramm mit  $C(\vartheta, \varphi = \varphi_0)$  die Strahlung im Elevationswinkel  $\vartheta$  angegeben wird und beim horizontalen Diagramm mit  $C(\vartheta = \pi/2, \varphi)$  die Strahlung im sogenannten Azimutwinkel  $\varphi$  angegeben wird. Dies resultiert in der E-Ebene für das vertikale Diagramm und in der H-Ebene für das horizontale Diagramm des z-Dipols (vergleichbar mit Abbildung 2.3). Beim x- und y-Dipol

ergibt sich eine identische Abstrahlungseigenschaft, wobei die Richtung der Abstrahlung nicht identisch ist. Dazu muss der Winkel  $\varphi_0$  jeweils angepasst werden, damit die korrekten Richtdiagramme dargestellt werden können.

Als letzter Teil der Theorie wird auf die Halbwertsbreiten  $\Delta\vartheta$  und  $\Delta\varphi$  eingegangen. Diese beschreiben die Breite der Hauptkeule, wobei der Winkel unter welchem die Hälfte der Strahlungsichte liegt angegeben wird (beziehungsweise der -3dB Punkt). Da wie schon erwähnt beim Hertzschen Dipol bei  $\pi/4$  die Richtcharakteristik  $1/\sqrt{2}$  beträgt, ergibt sich für die Halbwertsbreiten einen Winkel von  $90^\circ$ .

### 2.3 Simulation

Für die Simulation wurde eine CST Datei erstellt mit 1 GHz Grenzfrequenz. Die Länge beträgt  $\lambda_0/40$  und der Durchmesser ist um den Faktor 75 kleiner als die Länge. Für die Anregung in der Mitte wurde ein Vakuum erstellt, in welchem sich der Port zum Erregen befindet.



**Abbildung 2.5:** Richtdiagramm des Hertzschen Dipols.

In Abbildung 2.5 ist das Richtdiagramm der Simulation zu finden. Dabei strahlt die Hauptkeule wie berechnet in Richtung  $90^\circ$  ab und die Halbwertszahl beträgt  $89.9^\circ$ , was nur minimal vom Erwartungswert abweicht.

### 3 Linearantennen

Eine Linearantenne ist ein Typ Antenne, welche eine Länge um  $\lambda_0/2$  besitzt. Diese werden umgänglich für Mittel- und Langwellen Anwendungen gebraucht wegen ihrer Einfachheit.

#### 3.1 Theorie

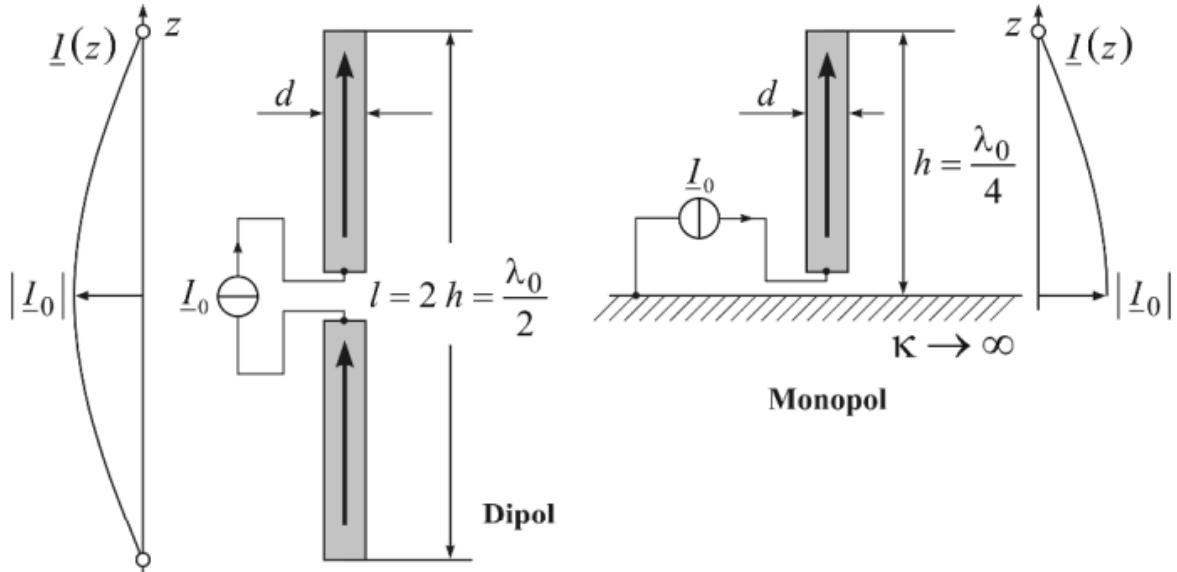
Die Antenne besteht aus einem geraden, zylindrischen Leiter, welcher einen dünnen Durchmesser besitzt. Dabei gilt, dass der Schlankheitsgrad

$$s = \frac{l}{d} = \frac{2h}{d} \geq 75 \quad (3.1)$$

beträgt und der Durchmesser

$$d \leq \frac{\lambda_0}{50} \quad (3.2)$$

erfüllt. Somit kann für die Berechnung der Felder die Integration über eine Hüllfläche durch eine eindimensionale Integration vereinfacht werden, was den Rechenaufwand erleichtert.



**Abbildung 3.1:** Unterschiedliche Speisung von Monopol und Dipolantennen.

Die lineare Antenne kann auf zwei Arten gespiesen werden. Entweder wird die Antenne als Monopol betrieben und am Fusspunkt gegen Erde erregt oder sie wird in der Mitte als Monopol symmetrisch erregt (dargestellt in Abbildung 3.1). Bei der Dipol Ausführung ist jedoch ein Spalt in der Mitte notwendig, welcher vernachlässigbar klein sein soll. Die beiden Anordnungen unterscheiden sich nicht im Strahlungsdiagramm da die Erdoberfläche die Symmetrieebene des elektrischen Feldes darstellt. Der Monopol, welcher halb so lang wie der Dipol gewählt wird, gibt bei einem identischen Speisestrom gerade die halbe Strahlungsleistung ab, was zu einem doppelten Gewinn führt.

Für die Simulationen interessieren uns die Richtdiagramme der Linearantennen. Dazu wurde der Halbwelldipol, der Ganzwellendipol und der Doppelwellendipol betrachtet. Die Herleitung der

Richtcharakteristik wurde weggelassen, da uns hauptsächlich die Simulationsresultate interessieren. Die bereits berechneten Werte wurden aus dem Buch von K. Kark entnommen [1].

Der Halbwellendipol besitzt eine Antennenlänge von  $\lambda_0/2$ , was zu einer Richtcharakteristik von

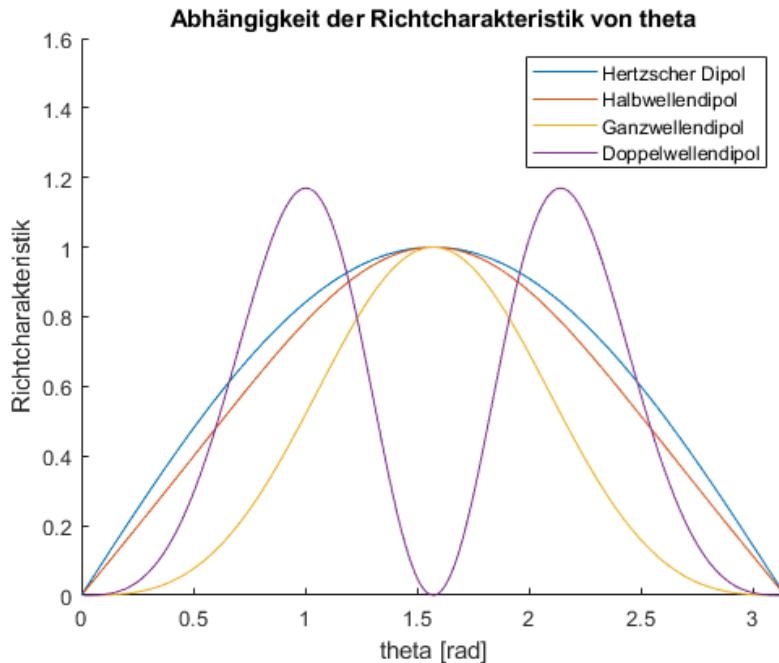
$$C(\vartheta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \quad (3.3)$$

führt. Die Richtcharakteristik des Ganzwellendipols beträgt bei dessen Antennenlänge von  $\lambda_0$

$$C(\vartheta) = \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta}. \quad (3.4)$$

Der Doppelwellendipol ist  $2\lambda_0$  lang und dessen Richtcharakteristik beträgt

$$C(\vartheta) = \frac{\sin^2(\pi \cos \vartheta)}{\sin \vartheta}. \quad (3.5)$$



**Abbildung 3.2:** Ein Plot der jeweiligen Richtcharakteristiken verschiedener Linearantennen (berechnet im MATLAB Code, welcher im Appendix ersichtlich ist).

In Abbildung 3.2 ist die Richtcharakteristik der Antennen in Abhängigkeit von  $\vartheta$  zu sehen. Dabei wurde der Hertzsche Dipol auch eingefügt, um die Richtdiagramme besser vergleichen zu können. Wie sich erkennen lässt, besitzt der Hertzsche Dipol die grösste Halbwertsbreite von allen Antennen. Beim Halbwellendipol ist diese nur leicht kleiner, wobei sich beim Ganzwellendipol eine bemerkbar kleinere Halbwertsbreite einstellt. Dabei liegen die -3dB Punkte bei 1.99 und 1.15, welche eine Halbwertsbreite von  $48^\circ$  besitzen. Diese beträgt fast halb so viel wie die  $90^\circ$  Halbwertsbreite des Hertzschen Dipols. Der Doppelwellendipol besitzt sogar eine Nullstelle bei  $\pi/2$ , wo sich die Maximalwerte der anderen Antennen befinden. Der Maximalwert des Doppelwellendipols liegt jedoch bei 1 und 2.14, was einen Maximalwert bei  $57.3^\circ$  und  $122.6^\circ$  ergibt. Dabei wird klar, dass das dazugehörige Richtdiagramm vier Keulen besitzen wird.

### 3.2 Simulation

Im Buch von K. Kark auf Seite 249 befindet sich eine Tabelle mit den Richtdiagrammen der obigen genannten linearen Antennen [1]. Dabei wurde die Länge der jeweiligen Antenne noch mit dem Faktor  $n$  angepasst, was uns aus den Formeln 3.3 bis 3.5 folgende Längen und Richtcharakteristiken ergeben:

Für den Halbwellendipol:

$$l = (2n - 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.6)$$

$$C(\vartheta) = \frac{\cos\left(\frac{2n-1}{2}\pi \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \quad (3.7)$$

Für den Ganzwellendipol:

$$l = (2n - 1)\lambda_0 \quad (3.8)$$

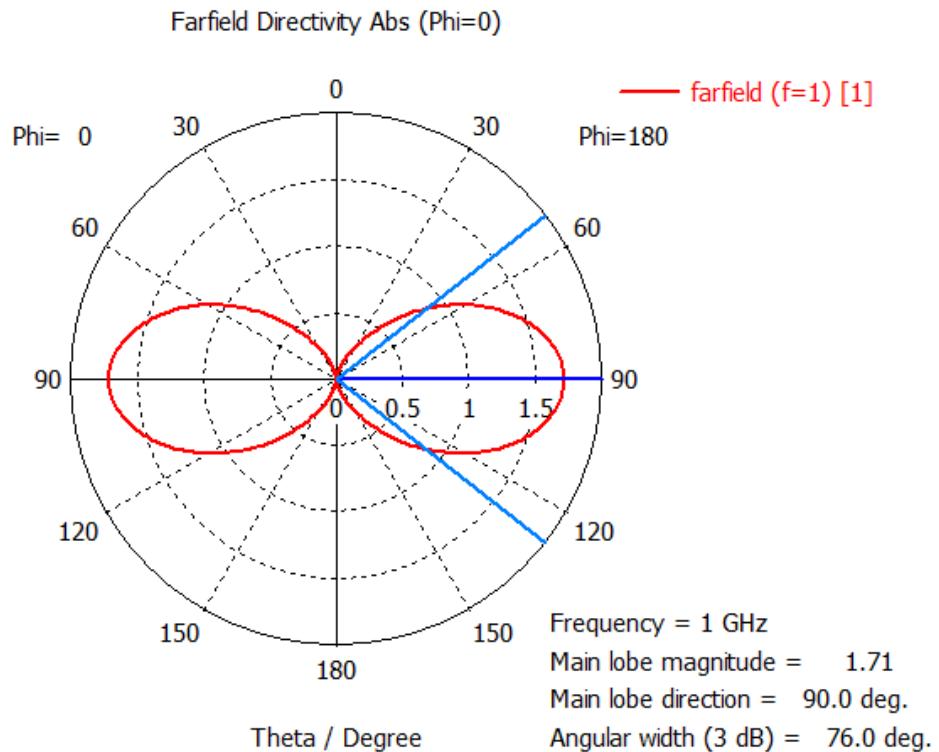
$$C(\vartheta) = \frac{\cos^2\left(\frac{2n-1}{2}\pi \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \quad (3.9)$$

Für den Doppelwellendipol:

$$l = 2n\lambda_0 \quad (3.10)$$

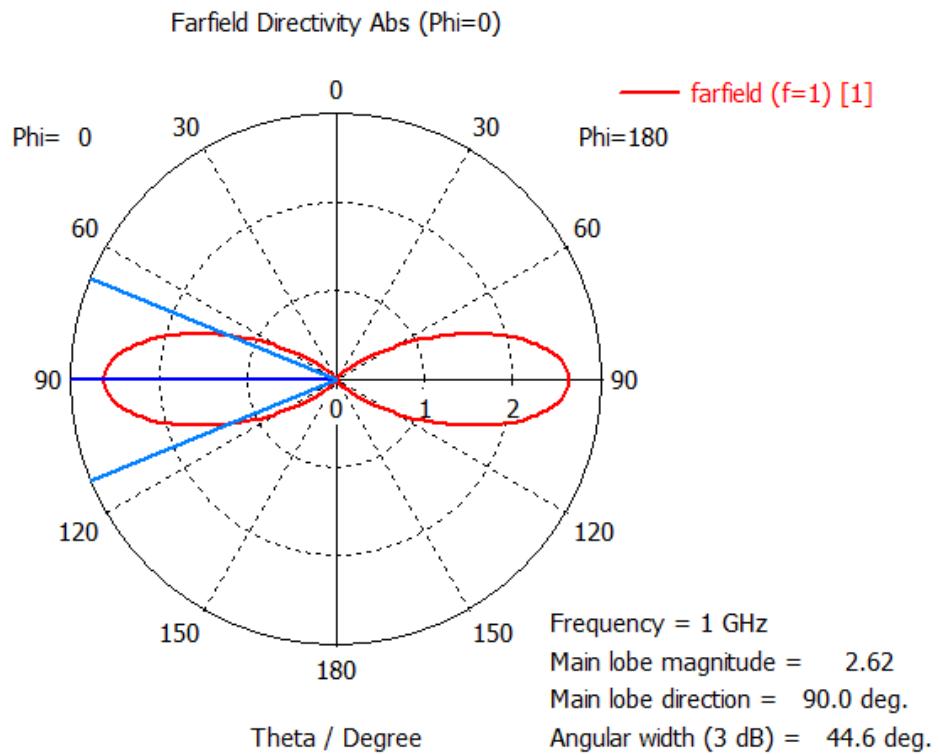
$$C(\vartheta) = \frac{\sin^2(n\pi \cos \vartheta)}{\sin \vartheta} \quad (3.11)$$

Für die Simulation wurde ein Dipol mit anpassbarer Länge aufgebaut, mit welchem zwischen den drei in den Formeln 3.6, 3.8 und 3.10 genannten Längen umgeschaltet werden kann. Für die Anregung sitzt ein Vakuum mit vernachlässigbarer Länge in der Mitte der Antenne, in welchem sich der Anregungspunkt befindet. Für die Simulation wurde das Standard Anregungssignal verwendet und als Frequenz wurde 1 GHz verwendet. Die Datei wurde so geschrieben, dass alle Antennentypen mit minimalem Aufwand simuliert werden können, ohne dass das Modell abgeändert werden muss. Für alle Abbildungen wurde der Vertikalschnitt der Richtcharakteristik genommen. Es entsteht eine Rotationssymmetrie auf der Antennenachse (was in der Simulation der z-Achse entspricht).



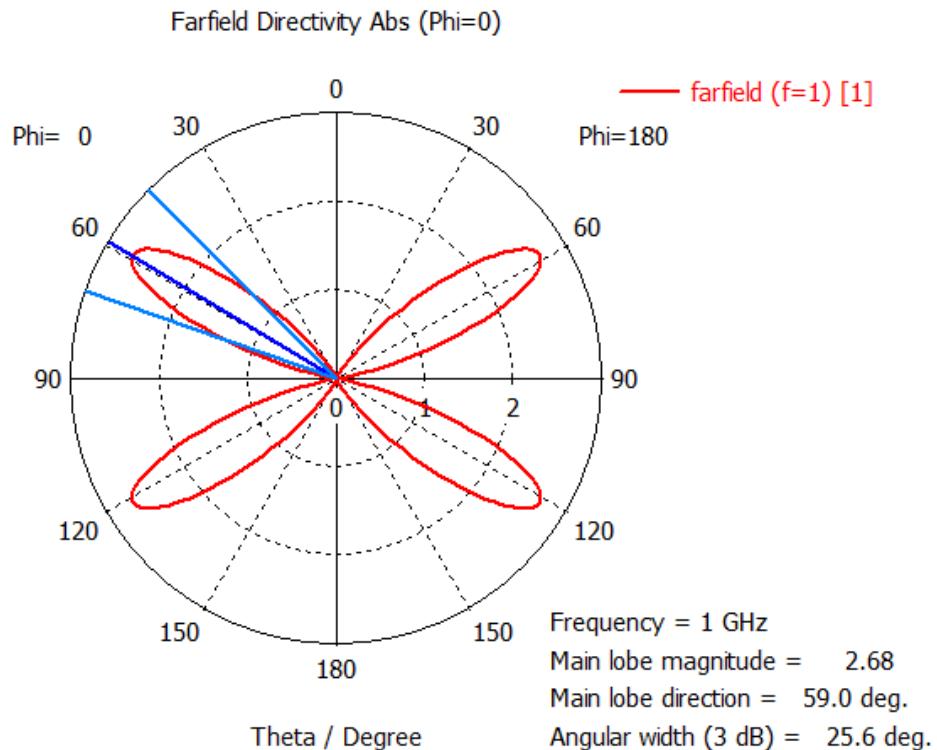
**Abbildung 3.3:** Direktivität der Halbwellendipolantenne.

In Abbildung 3.3 ist das Richtdiagramm des Halbwellendipols zu sehen. Wie bereits erwähnt ist dessen Halbwertsbreite leicht kleiner als  $90^\circ$  welche bei  $\vartheta = 90^\circ$  am stärksten abgestrahlt wird.



**Abbildung 3.4:** Richtdiagramm des Ganzwellendipol.

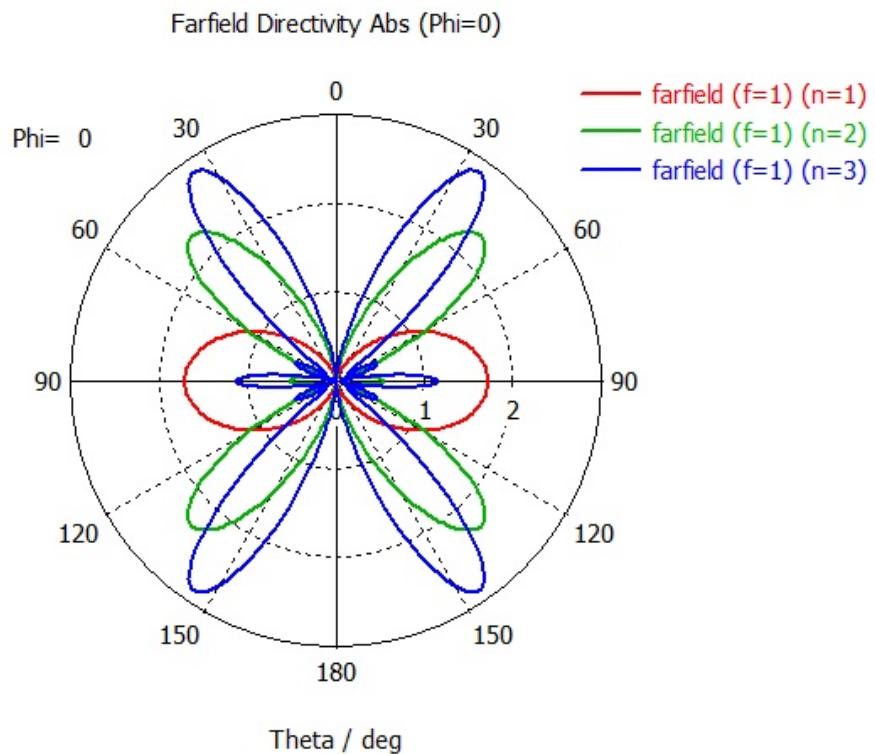
Abbildung 3.4 zeigt die Direktivität des Ganzwellendipols. Berechnet wurde dabei eine Halbwertsbreite von  $48^\circ$  und simuliert wurde eine Halbwertsbreite von  $44.6^\circ$ . Diese Abweichung ist minimal, weshalb die Simulation als erfolgreich verifiziert werden kann. Auch hier ist die Richtung der maximalen Leistungsabgabe identisch mit dem vorherigen Resultat.



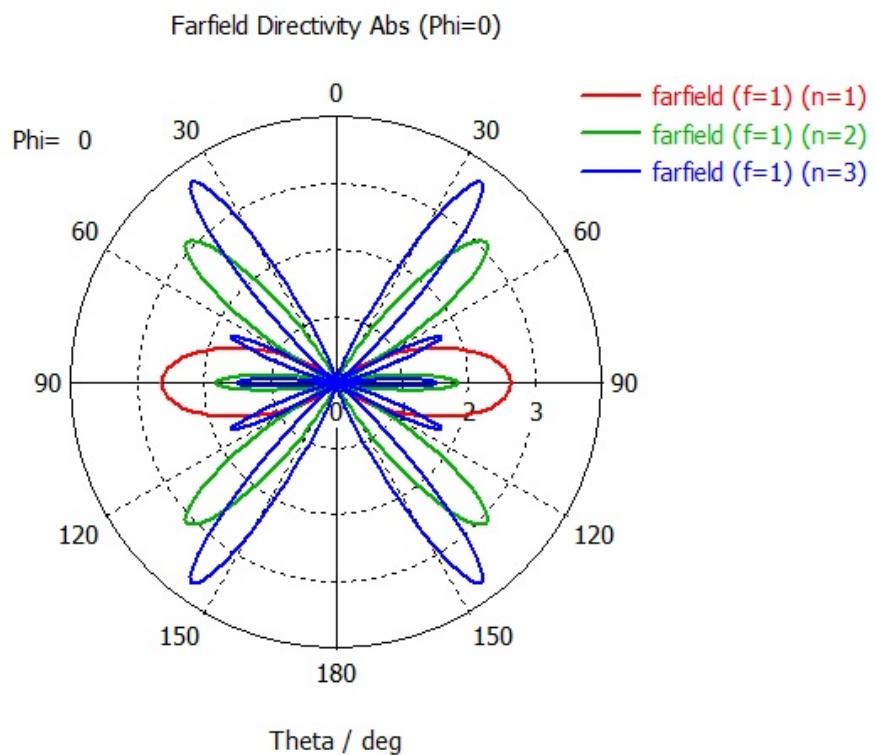
**Abbildung 3.5:** Resultat der Simulation des Doppelwellendipols.

Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, verhält sich das Richtdiagramm wie im Abschnitt 3.1 beschrieben wurde. Es entstehen vier Keulen, wobei der Winkel der Keule bei der Simulation  $59^\circ$  beträgt anstelle der berechneten  $57.3^\circ$ . Dies ist auch wiederum eine vernachlässigbar kleine Abweichung.

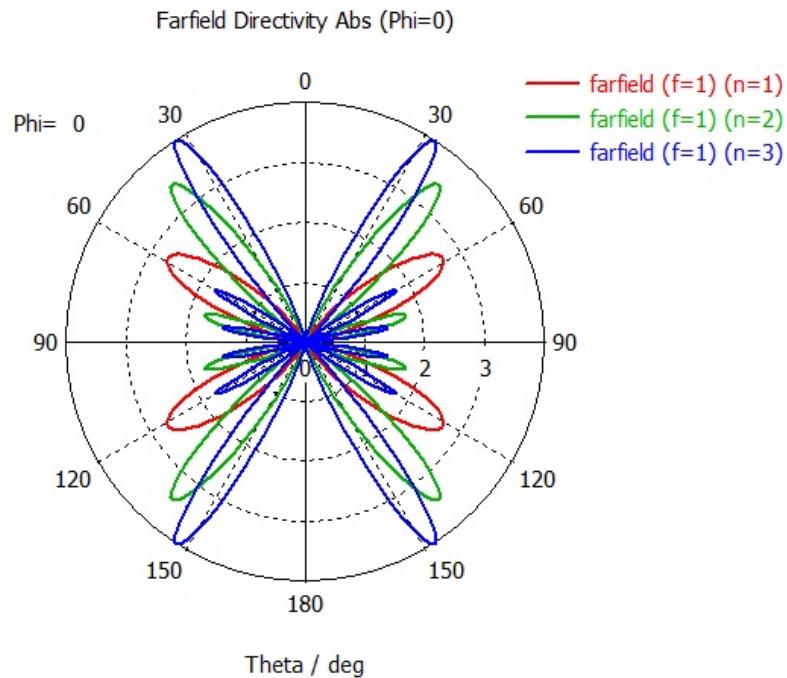
Als Abschluss der linearen Antenne wurden in Abbildungen 3.6 bis 3.8 die höheren Ordnungen für  $n$  simuliert.



**Abbildung 3.6:** Direktivität der Halbwellendipolantenne mit  $n = 1 \dots 3$ .

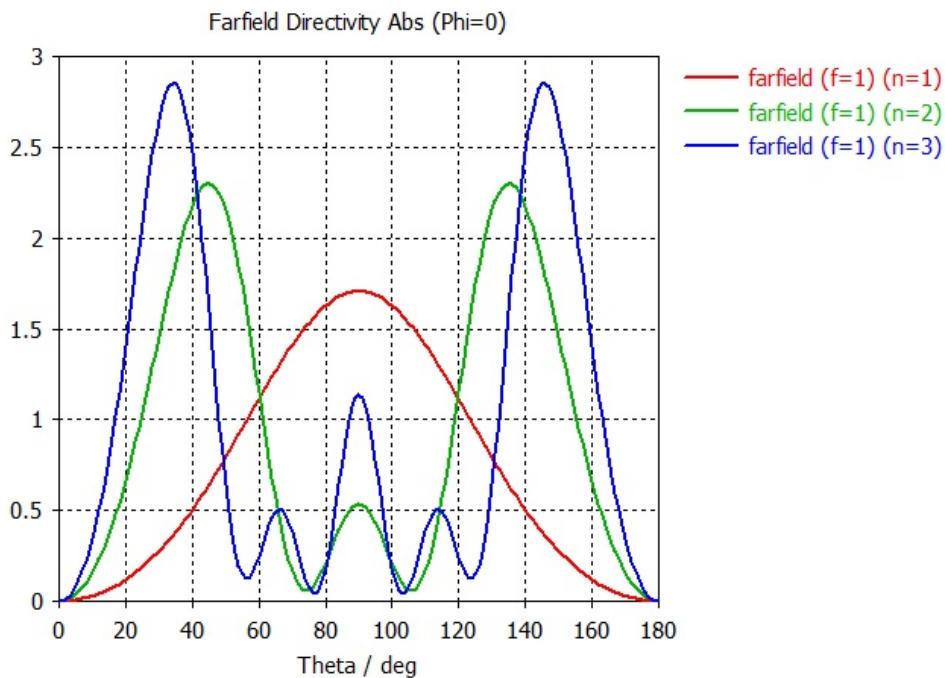


**Abbildung 3.7:** Richtdiagramm des Ganzwellendipoles mit  $n = 1 \dots 3$ .



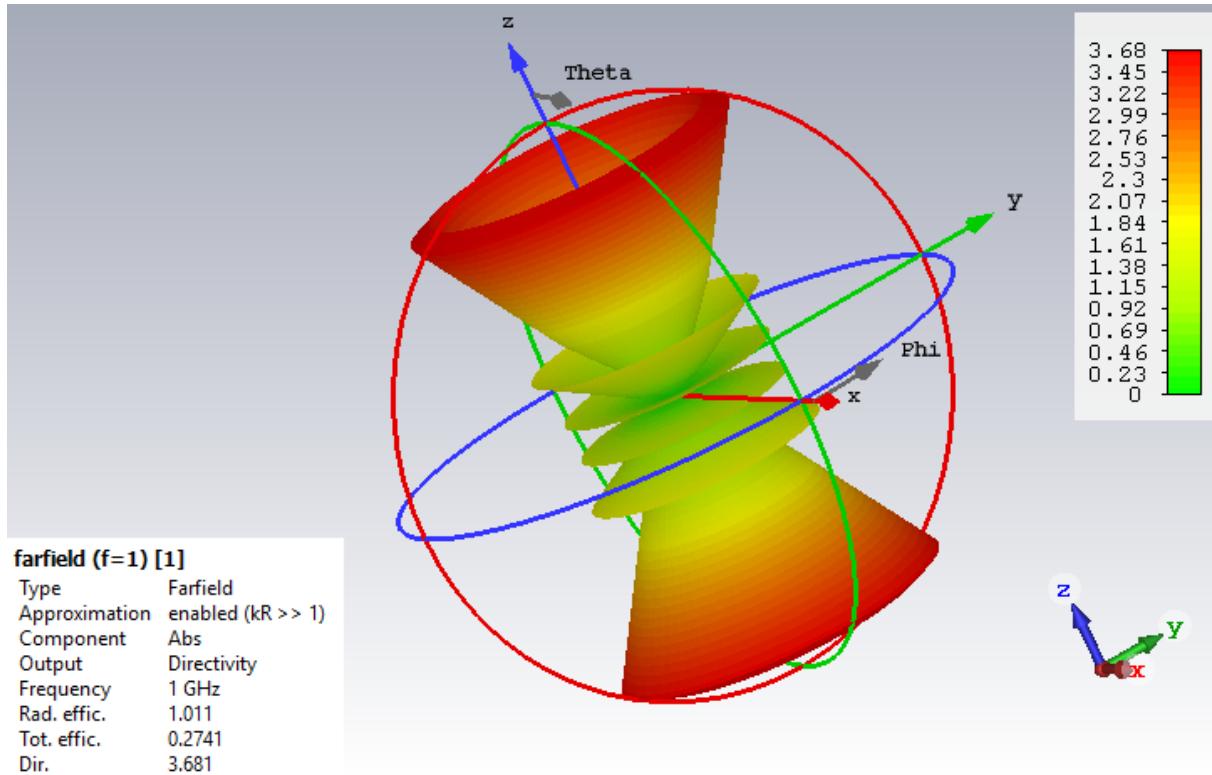
**Abbildung 3.8:** Resultat der Simulation des Doppelwellendipols mit  $n = 1\dots 3$ .

Die Resultate decken sich alle mit der Theorie des Fachbuches. Die Anzahl Seitenkeulen steigt identisch mit den im Fachbuch beschriebenen Abbildungen wenn die Ordnung  $n$  vergrössert wird, wobei ab einer Länge grösser als  $\lambda_0$  Seitenkeulen entstehen. Diese entstehen durch Überlagerungen von Beiträgen der Elementarstrahlern.



**Abbildung 3.9:** Direktivität der Halbwelldipolantenne mit  $n = 1\dots 3$  in kartesischen Koordinaten.

Natürlich kann auch im Vergleich zu Abbildung 3.2 das Resultat in kartesischen Koordinaten dargestellt werden. Dies resultiert in Abbildung 3.9. Somit stellt dieser Plot dasselbe Resultat wie Abbildung 3.6 dar, wobei bei den kartesischen Koordinaten das Herauslesen der Halbwertsbreite etwas einfacher ist. Bei den Kugelkoordinaten fällt es hingegen leichter, sich die Abstrahlungsrichtungen vorzustellen.



**Abbildung 3.10:** Darstellung des Doppelwellendipols mit  $n = 3$  in dreidimensionalen Koordinaten.

Dabei zeigt Abbildung 3.10 die dreidimensionale Direktivität. Es ist ausserdem zu sehen, wie die Antenne geschnitten wurde, um das Richtdiagramm darzustellen (im Vertikalschnitt). Wichtig zu wissen ist, dass verschiedene Antennen in andere Richtungen abstrahlen und daher der Schnittwinkel angepasst werden muss (vergleichsweise Hertzscher Dipol entlang der verschiedenen Achsen in Abschnitt 2.1).

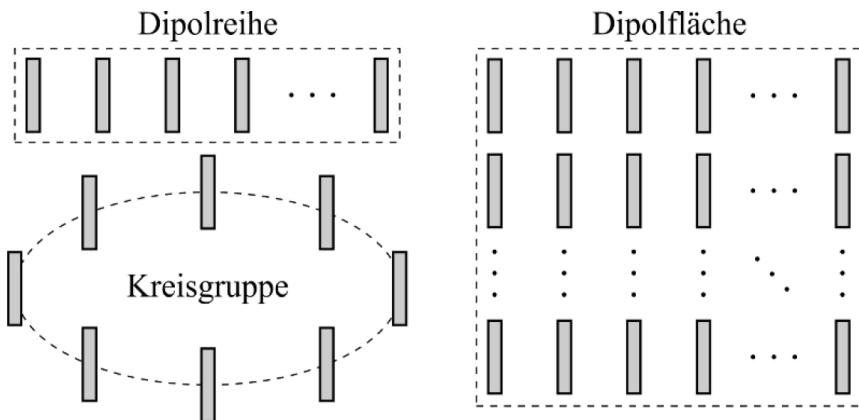
## 4 Gruppenantennen

Der Dipol ist ein Rundstrahler, da die Strahlung keine bevorzugte Richtung in der Ebene senkrecht zur Antennenachse aufweist. Bei Punkt-zu-Punkt Verbindungen kann die Reichweite der Antenne bei unveränderter Energie erheblich vergrössert werden, wenn eine Richtwirkung vorhanden ist. Mit der Richtwirkung lässt sich der Störabstand verbessern, da mögliche Störquellen durch die Richtcharakteristik zum Teil ausgeblendet werden. Eine gewünschte Richtwirkung kann durch Kombination zweier oder mehrerer Dipole mittels Interferenz der Feldstärken erzeugt werden.

Die folgenden Betrachtungen basieren auf dem linearen Superpositionsprinzip. Dies geht davon einer ungestörten Überlagerung der Strahlungsbeiträge aller Teilstrahler aus. Das Maximum des resultierenden Feldes befindet sich dort, wo die Felder der Einzelstrahler phasengleich schwingen. Die Felder der Einzelstrahler, die ausserhalb der Hauptstrahlungsrichtung sind, löschen sich gegenseitig mehr oder weniger aus. Die Richtwirkung kann mit diesen Faktoren beeinflusst werden.

- Anzahl Strahler
- Anordnung der Strahler
- Stromamplitude der einzelnen Strahler
- Phasenverschiebung der einzelnen Strahler

In der Abbildung 4.1 sind drei unterschiedliche Formen von Gruppen aus Dipolantennen die sich für die Nachrichtenübertragung bewährt haben.



**Abbildung 4.1:** Anordnung von Einzelstrahlern zu einer Antennengruppe.

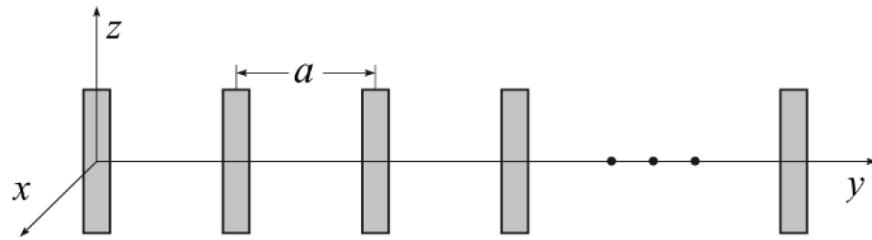
Bei Strahlergruppen mit bauartgleichen Teilanennen in gleicher räumlicher Ausrichtung lässt sich das Fernfeld als Produkt von zwei Faktoren schreiben. Der erste Faktor ist die Einzelcharakteristik  $C_E$  und beschreibt das Fernfeld des einzelnen Antennenelementes. Die Gruppencharakteristik  $C_{Gr}$  ist der zweite Faktor. Er ist unabhängig von der Art des Einzelstrahlers und beschreibt das Zusammenwirken der Strahler. Unter der Voraussetzung dass die Entfernung des Aufpunktes im Fernfeld gross gegen die räumlichen Abmessungen des Antennensystems aus mehreren Einzelstrahlern und gross gegen die Wellenlänge  $\lambda_0$  so können die beiden Faktoren multipliziert werden. Dies ergibt die nachfolgende Formel.

$$C_{ges} = C_{Gr} C_E \quad (4.1)$$

## 4.1 Querstrahler

Der Querstrahler gehört zu den linearen Gruppenstrahlern und ist eine Dipolzeile, welche in der Abbildung 4.2 dargestellt ist. Bei dieser Gruppe stehen die Dipole senkrecht zur Standlinie ( $y$ -Achse).

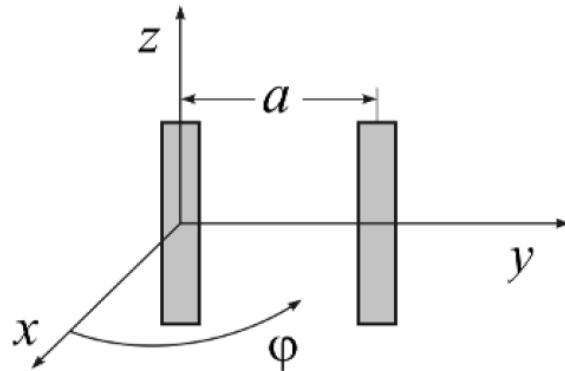
Beim Querstrahler ist die Gruppencharakteristik rotationssymmetrisch zur Gruppenachse. Sie entsteht indem alle Einzelstrahler gleichphasig  $\delta = 0$  erregt werden. Denn dann sind in der Mittelsenkrechten zur Gruppenachse ihre sämtlichen Feldanteile in Phase. Zusätzlich muss der Elementabstand  $a < \lambda_0$  sein, damit der Hauptanteil der Energie senkrecht zur Gruppenachse in einen scheibenförmigen Sektor ausgestrahlt wird und weitere Hauptkeulen nicht auftreten können.



**Abbildung 4.2:** Anordnung von baugleichen, äquidistanten Einzelstrahlern zu einer Horizontaler Dipolzeile.

## 4.2 Simulation

Für die Simulation ist eine querstrahlende Dipolzeile mit zwei Einzelstrahlern, wie in der Abbildung 4.3 aufgebaut worden. Der Dipolabstand beträgt  $a = 2\lambda_0$ . Dieser führt bei einfacher Speisung zu einer guten Querabstrahlung bei kleinen Nebenkeulen.



**Abbildung 4.3:** Aufbau des Querstrahlers.

Die Gruppencharakteristik für zwei Strahlerelemente lässt sich mit der Formel einer linearen Gruppe wie folgt berechnen:

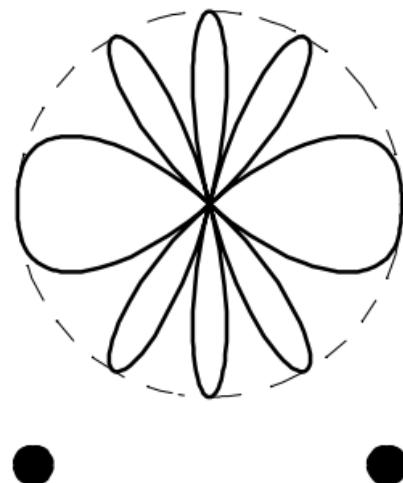
$$C_{Gr}(\vartheta, \varphi) = \left| \cos \left( \frac{\sin(Nu/2)}{N \sin(u/2)} \right) \right| = \left| \cos \left( \frac{\sin(u)}{2 \sin(u/2)} \right) \right|. \quad (4.2)$$

Diese Formel lässt sich vereinfachen und erhält dieses Resultat:

$$C_{Gr}(\vartheta, \varphi) = \left| \cos \left( \frac{k_0 a}{2} \sin \vartheta \sin \varphi \right) \right|. \quad (4.3)$$

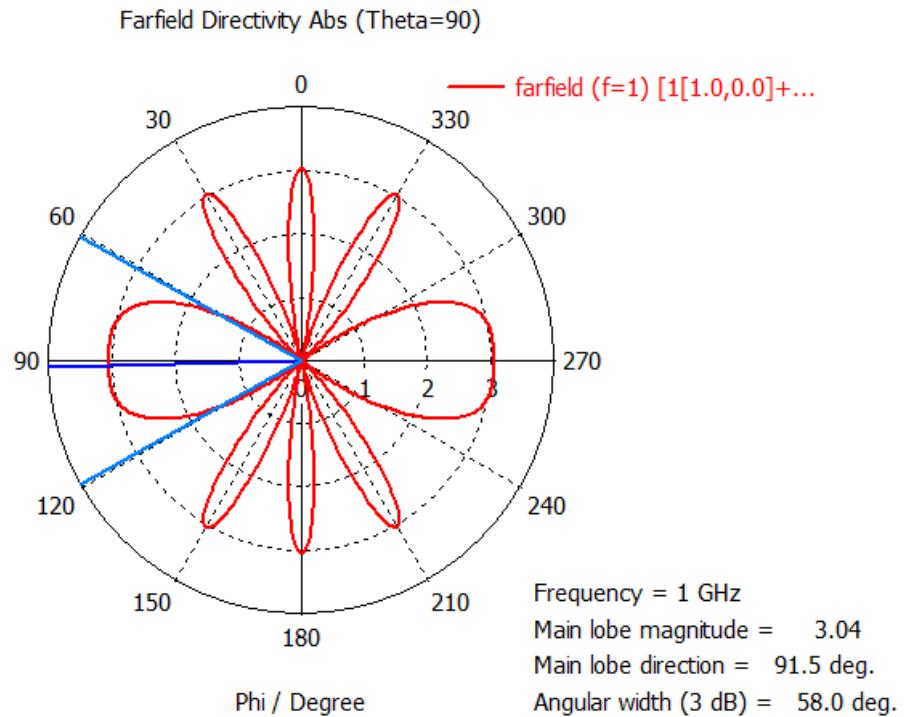
Das horizontale Richtdiagramm erhält man für  $\vartheta = \pi/2$ :

$$C_{Gr}^H(\varphi) = \left| \cos \left( \frac{\pi a}{\lambda_0} \sin \varphi \right) \right|. \quad (4.4)$$



**Abbildung 4.4:** Direktivität des Antennenarrays mit einem Abstand von  $2\lambda_0$ .

In Abbildung 4.4 ist das Richtdiagramm für zwei Dipole mit dem Abstand  $2\lambda_0$  zu sehen. Dies ist das erwünschte Resultat der Simulation.

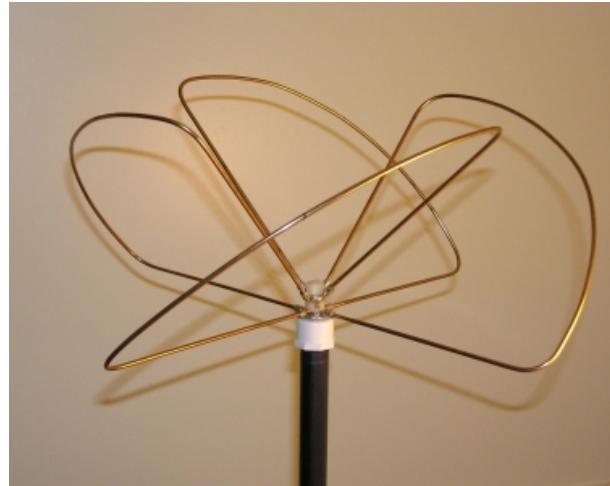


**Abbildung 4.5:** Simulation des Antennenarrays mit  $a = 2\lambda_0$ .

In der Abbildung 4.5 ist das Richtdiagramm grafisch dargestellt. Die Anzahl der Nebenkeulen und auch die Form des Richtdiagrammes stimmen mit dem erwarteten Plot überein, weshalb die Simulation als erfolgreich angesehen werden kann. Was jedoch beachtet werden muss, ist dass durch die Abstrahlcharakteristik das Richtdiagramm bei einem konstanten Winkel von  $\vartheta$  ausgewertet werden muss, welcher  $90^\circ$  beträgt.

## 5 Kleeblattantenne

Für eine erweiterte Simulation war die Modellierung einer Kleeblattantenne vorgesehen gewesen. Die Kleeblattantenne ist anhand der Webseite "Cloverleaf Antennas" dimensioniert und aufgebaut worden [3].

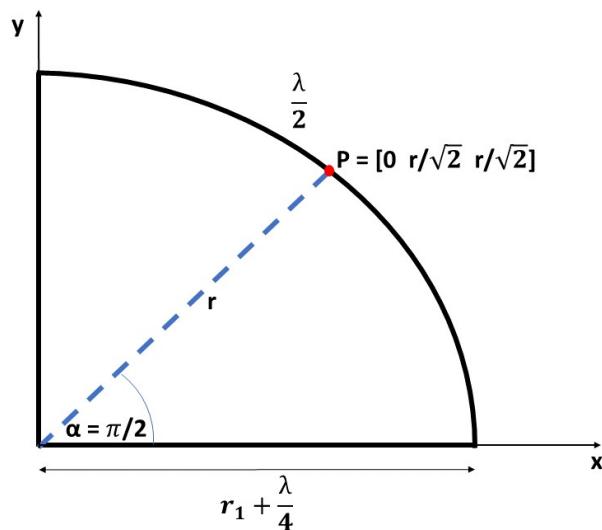


**Abbildung 5.1:** Kleeblattantenne mit vier Bögen [3].

Abbildung 5.1 zeigt dabei eine Kleeblattantenne mit vier Bögen, welche für die Simulation modelliert wurde.

### 5.1 Theorie

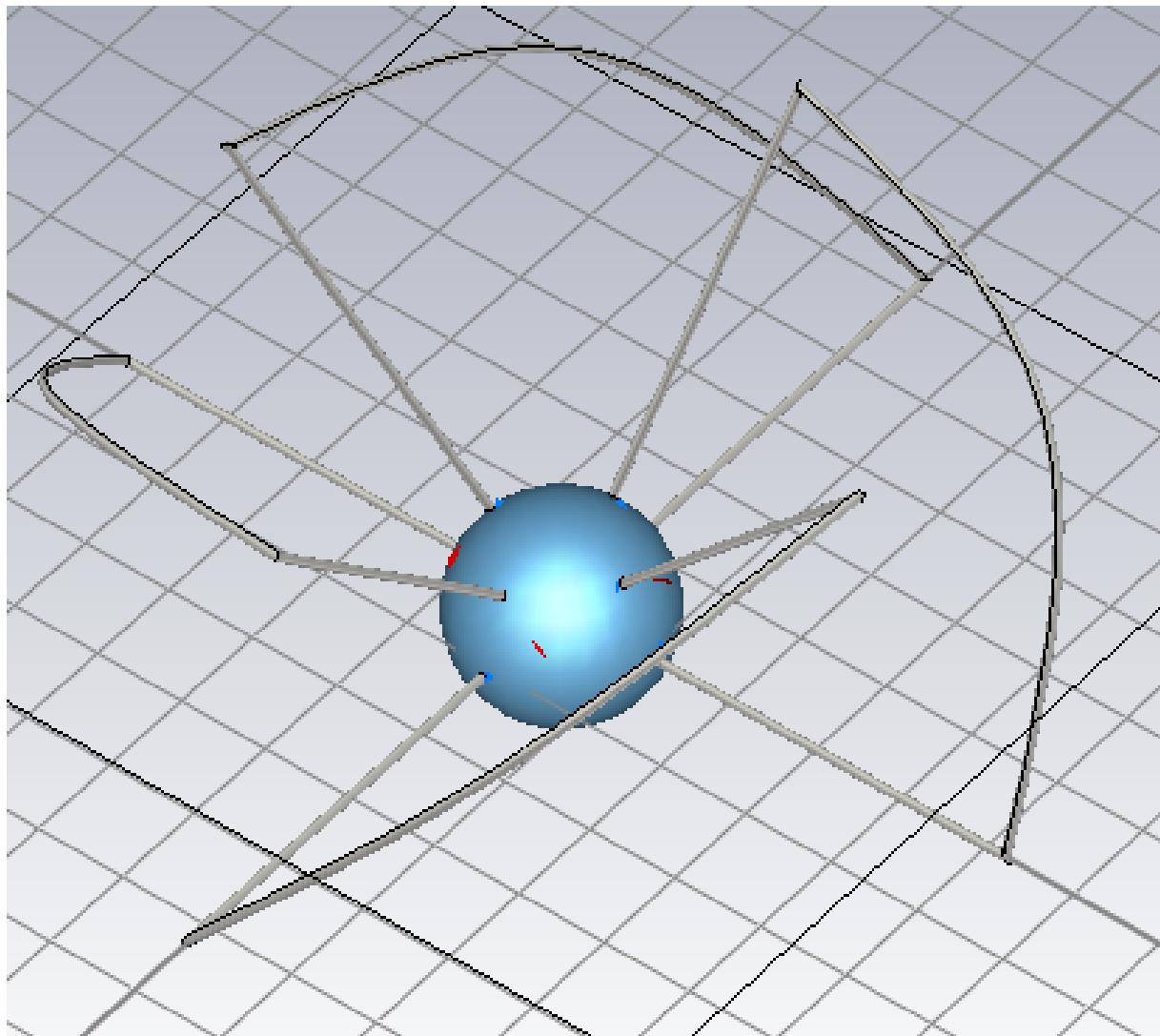
Um die Antenne aufzubauen zu können sind folgende Berechnungen durchgeführt worden:



**Abbildung 5.2:** Aufbau eines Kleeblattbogens.

In der Abbildung 5.2 ist ein Kleeblattbogen abgebildet. Die Länge  $r$  lässt sich als  $\lambda/4 + r_1$  definieren. Der Bogen selber hat eine Länge von  $\lambda/2$ , wobei sich eine Länge von  $\lambda + 2r_1$  für ein einzelnes Blatt einstellt.  $r_1$  stellt den Radius des Vakuums in der Mitte dar, damit die effektive Länge des Bogens auch  $\lambda$  beträgt, wenn ein Port zur Anregung angeschlossen wird. Der Punkt

P gilt als Stützstelle für den Bogen, welcher durch die 3D Spline des Programmes angenähert wird.



**Abbildung 5.3:** Modellierte Kleeblattantenne in CST.

Abbildung 5.3 zeigt die modellierte Kleeblattantenne. Mit dieser wurden die Simulationen durchgeführt.

## 5.2 Simulation

Für die Kleeblattantenne wäre eine Simulation vorgesehen gewesen. Jedoch konnte bisher keine erfolgreiche Simulation durchgeführt werden, da der Solver entweder frühzeitig abbricht, die Simulation nach mehreren Stunden nicht annähernd fertiggestellt werden konnte oder sogar der Prozessor abstürzte. Daher werden zur Abgabe dieses Projektes die Simulationsdateien beigefügt, damit nachträglich noch Simulationen durchgeführt werden können.

## 6 Fazit

Als Fazit kann gesagt werden, dass alle Simulationen erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Es war sehr interessant, die verschiedenen Antennen in CST zu testen und dabei ein neues Tool kennen zu lernen. Etwas enttäuschend war dass keine erfolgreiche Simulation der Kleeblattantenne durchgeführt werden konnte. Das Modellieren einer Antenne, welche nicht blass ein gerader Dipol ist, war dennoch sehr interessant. Der Lerngewinn während des Schreibens des Berichtes war gross und mit Hilfe dessen kann auch immer wieder auf das erarbeitete Wissen zurückgegriffen werden. Deshalb können wir sagen, dass dieser Bericht trotzdem ein Erfolg war.

## Literatur

- [1] K. W. Kark, *Antennen und Strahlungsfelder*. Vieweg+Teubner, 2011.
- [2] *Hertzscher Dipol*, <https://www.abiweb.de/physik-elektromagnetismus/elektromagnetische-wellen/hertzscher-dipol.html>.
- [3] *Cloverleaf Antennas*, <http://www.antenna-theory.com/antennas/cloverleaf.php>, 2016.

## 7 Appendix

```

1 %Richtcharakteristik.m
2
3 %Thomas Frei & Simon Zoller
4
5 %% Hertzscher Dipol
6
7 %Kugelkoordinaten
8 theta=0:0.01:2*pi;
9 phi = 0:0.01:2*pi;
10
11 %Richtcharakteristik
12 C = cell(6);
13
14 %Titel
15 plotTitle = cell(6);
16 plotTitle{1} = 'Vertikales Richtdiagramm z-Dipol';
17 plotTitle{2} = 'Horizontales Richtdiagramm z-Dipol';
18 plotTitle{3} = 'Vertikales Richtdiagramm x-Dipol';
19 plotTitle{4} = 'Horizontales Richtdiagramm x-Dipol';
20 plotTitle{5} = 'Vertikales Richtdiagramm y-Dipol';
21 plotTitle{6} = 'Horizontales Richtdiagramm y-Dipol';
22
23 %z-Dipol
24 C{1} = abs(sin(theta));
25 C{2} = ones(size(theta));
26
27 %x-Dipol
28 C{3} = abs(sqrt(1-sin(theta).^2.*cos(pi/2).^2));
29 C{4} = abs(sqrt(1-sin(pi/2).^2.*cos(phi).^2));
30
31 %y-Dipol
32 C{5} = abs(sqrt(1-sin(theta).^2.*sin(pi).^2));
33 C{6} = abs(sqrt(1-sin(pi/2).^2.*sin(phi).^2));
34
35 %Plot in Schleife
36 for ind=1:6
37 subplot(3, 2, ind) ;
38 polarplot(theta,C{ind});
39 pax = gca;
40 pax.ThetaDir = 'clockwise';
41 pax.ThetaZeroLocation = 'top';
42 rlim([0 1]);
43 title(plotTitle{ind});
44 end
45
46 %% Linearantennen
47
48 C = cell(4);
49 theta=0:0.01:pi;
50
51 %Hertzscher Dipol
52 C{1} = sin(theta);
53
54 %Halbwellendipol
55 C{2} = cos(pi/2*cos(theta))./sin(theta);
56
57 %Ganzwellendipol
58 C{3} = cos(pi/2*cos(theta)).^2./sin(theta);

```

```
59
60 %Doppelwellendipol
61 C{4} = sin(pi*cos(theta)).^2./sin(theta);
62
63 %Plot Resultate
64 figure();
65 hold on
66 for ind=1:4
67 plot(theta, C{ind});
68 end
69
70 ylim([0 1.6]);
71 xlim([0 pi]);
72 title('Abhaengigkeit der Richtcharakteristik von theta');
73 legend('Hertzscher Dipol', 'Halbwellendipol', 'Ganzwellendipol', ...
    'Doppelwellendipol');
74 xlabel('theta [rad]');
75 ylabel('Richtcharakteristik');
```