

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Sabine Sengemann

Entwicklung einer Software zur Berechnung der  
Strahlungscharakteristik von Gruppenantennen

Sabine Sengermann

Entwicklung einer Software zur Berechnung der  
Strahlungscharakteristik von Gruppenantennen

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Ing Aining Li  
Zweitgutachter : Prof. Dr. Jürgen Missun

Abgegeben am 20. Januar 2010

**Sabine Sengelmann**

**Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung einer Software zur Berechnung der Strahlungscharakteristik von Gruppenantennen.

**Stichworte**

Gruppenantennen, Strahlungscharakteristik, Theorie der Antennen, QuickBASIC, Matlab, vektorielle Addition von Feldstärken, Messung im Freifeld, Gleichungen zu Berechnung von Antennencharakteristiken, Polardiagramm

**Kurzzusammenfassung**

Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist es, ein altes QuickBASIC-Programm des NDR zur Berechnung von Antennendiagrammen zu analysieren und in Matlab nachzubilden. Die Antennenhersteller liefern seit einiger Zeit erweiterte und detailliertere Primärdaten der Antennen. Das Matlab-Programm muss für die Verwendung dieser Daten ergänzt werden. Außerdem wird das Programm mit Gleichungen der Literatur und eigenen Freifeldmessungen verglichen. Eine Zusammenfassung und Analyse der Ergebnisse schließt die Arbeit ab.

**Sabine Sengelmann**

**Title of the paper**

Development of a software to calculate radiation patterns for antenna arrays.

**Keywords**

Antenna arrays, antenna radiation patterns, QuickBASIC, Matlab, theory of antennas, vectorial addition of field strengths, open area test site, equations to calculate radiation patterns, polar diagram

**Abstract**

This bachelor's thesis deals with the analysis of an old QuickBASIC program owned by the NDR. The program is to be rebuilt in Matlab. Recently manufactures of antennas are offering extended and more detailed primary data for antenna panels. To use these data the Matlab program is enhanced. The Matlab program is compared with equations from the literature and measurements performed on an open area test site. Finally the results are summarized and analyzed.

## Inhalt

|  |     |
|--|-----|
| Inhalt .....   | I   |
| Abbildungsverzeichnis.....   | III |
| Tabellenverzeichnis:.....  | V   |
| Begriffsdefinitionen.....  | VI  |
| Vorwort.....   | IX  |
| 1 Einleitung .....   | 1   |
| 1.1 Aufgabenstellung und Spezifikation .....   | 1   |
| 1.2 Vorgehensweise .....   | 2   |
| 2 Theoretische Grundlagen .....  | 3   |
| 2.1 Antennengrundlagen.....  | 3   |
| 2.2 Der Hertzsche Dipol.....   | 7   |
| 2.3 Der reale Dipol .....  | 9   |
| 2.4 Antennen-Bauformen.....  | 12  |
| 2.5 Kombinationen von Dipolantennen .....  | 17  |
| 2.5.1 Herleitung der Gleichungen für Dipolgruppen.....                               | 19  |
| 2.5.2 Vergleich von zwei Rechenwegen zur Bestimmung des Antennendiagramms .....      | 23  |
| 3 Analyse des QuickBASIC Programms.....  | 27  |
| 3.1 Grundidee.....   | 27  |
| 3.2 Daten zur Berechnung der Diagramme .....   | 28  |
| 3.3 Bestimmung der Phase der Einzelstrahler am Aufpunkt P.....                       | 30  |
| 3.3.1 Bestimmung der Phase aus dem Weg vom Einzelstrahler zum Aufpunkt P .....       | 30  |
| 3.3.2 Berechnung der Gesamtphase eines Einzelstrahlers am Aufpunkt P.....            | 33  |
| 3.3.3 $\alpha$ und $\beta$ und ihre Maxima .....                                     | 33  |
| 3.4 Bestimmung der Amplitude des Einzelstrahlers am Aufpunkt P .....                 | 34  |
| 3.4.1 Berechnungswege für die unterschiedlichen Bauformen der Antennenelemente ..... | 35  |
| 3.4.2 Der Horizontalkorrekturfaktor.....   | 35  |
| 3.4.3 Verwendung der Fourier-Koeffizienten in Matlab .....                           | 37  |
| 3.4.4 Unterscheidung der 5 verschiedenen Elementarten .....                          | 37  |
| 3.5 Addition der Real- und Imaginärteile aller Antennenelemente am Mast .....        | 46  |
| 4 Nachbildung und Erweiterung des Programms in Matlab .....                          | 48  |
| 4.1 Nachbildung des QuickBASIC Programms in Matlab .....                             | 48  |

---

|  |     |
|--|-----|
| 4.2 Erweitertes Matlab Programm für die Verwendung neuer Herstellerdaten .....       | 50  |
| 5 Verifikation des Matlab-Programms .....  | 53  |
| 5.1 Verifikation durch Simulationen .....  | 54  |
| 5.1.1 Vergleich der Rechenwege mit Gleichungen aus der Literatur.....                | 55  |
| 5.1.2 Evaluierung der verschiedenen Rechenwege unter Verwendung von Primärdaten..... | 59  |
| 5.2 Verifizierung des Matlab-Programms durch Test in der Praxis .....                | 64  |
| 5.2.1 Charakterisierung der verwendeten Komponenten für die Messungen .....          | 65  |
| 5.2.2 Durchführung des Tests .....   | 72  |
| 5.2.3 Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungen des Matlab-Programms.....    | 76  |
| 6 Abschlussbetrachtung.....  | 88  |
| 6.1 Überblick über die Rechenwege des Matlab-Programms.....                          | 88  |
| 6.2 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.....                                | 89  |
| 6.3 Ausblick und Weiterentwicklung .....   | 90  |
| 7 Quellen.....   | 91  |
| Anhang.....  | 92  |
| A Die Variablen des QuickBASIC-Programms.....  | 92  |
| B Analyse des Quellcodes des Quick-Basic Programms.....                              | 94  |
| C Matlab-Programm zur Berechnung von Antennendiagrammen .....                        | 101 |
| D Matlab-Programm für zwei horizontale Dipole.....                                   | 108 |
| E Tabelle des Horizontalkorrekturfaktors .....                                       | 109 |
| F Messen der elektrischen Länge einer Leitung.....                                   | 110 |
| G Daten der in Kapitel 5.1 verwendeten Antenne K 72 31 47 .....                      | 111 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| Abbildung 1: Das Koordinatensystem .....   | VII  |
| Abbildung 2: Berechnung des Winkels $\alpha$ .....   | VIII |
| Abbildung 3: Koordinatensystem .....   | 3    |
| Abbildung 4: Skizze eines Dipols.....  | 4    |
| Abbildung 5: Stromverteilung auf einem Dipol der Länge $0,2 \lambda$ .....   | 5    |
| Abbildung 6: Stromverteilung auf einem Dipol der Länge $0,5 \lambda$ .....   | 5    |
| Abbildung 7: Stromverteilung auf einem Dipol der Länge $1 \lambda$ .....   | 6    |
| Abbildung 8: Hertzscher Dipol.....   | 7    |
| Abbildung 9: Vertikale Charakteristik eines senkrechten Hertzschen Dipols.....   | 8    |
| Abbildung 10: Realer Dipol, Skizze für den Gangunterschied.....  | 9    |
| Abbildung 11: Vertikale Charakteristik eines senkrechten $\lambda/2$ Dipols .....  | 10   |
| Abbildung 12: Faltdipol.....   | 12   |
| Abbildung 13: Dreielementige Yagi-Antenne .....  | 13   |
| Abbildung 14: Kreuzdipol.....  | 14   |
| Abbildung 15: Spreizdipol.....   | 14   |
| Abbildung 16: Batwing-Dipol .....  | 15   |
| Abbildung 17: Superturnstile-Antenne .....   | 15   |
| Abbildung 18: Quadantenne.....   | 16   |
| Abbildung 19: Senkrechte Dipole in x-Richtung.....   | 19   |
| Abbildung 20: Wegdifferenz der Dipole zum Aufpunkt P.....  | 20   |
| Abbildung 21: Senkrechte Dipole in y-Richtung.....   | 21   |
| Abbildung 22: Senkrechte Dipole in z-Richtung.....   | 22   |
| Abbildung 23: Skizze der Dipolanordnung.....   | 24   |
| Abbildung 24: Skizze zur vektoriellen Addition .....   | 24   |
| Abbildung 25: Berechnung des Abstandes zwischen Antennengruppenmittelpunkt und<br>Phasenzentrum der Antenne. ....                        | 31   |
| Abbildung 26: Berechnung der Phasendifferenz aus der geometrischen Anordnung.....  | 32   |
| Abbildung 27: Berechnung des Winkels $\alpha$ .....  | 33   |
| Abbildung 28: Vergleich verschiedener Dipolgleichungen auf 1 normiert.....   | 36   |
| Abbildung 29: Flussdiagramm für Elementart 1 (Feld), 2 (Dipol) und 4 (Yagi).....   | 38   |
| Abbildung 30: Abschnitt 1 aus dem Flussdiagramm .....  | 39   |
| Abbildung 31: Vertikaldiagramm einer Yagi-Antenne (Gleichung 3-13).....  | 39   |
| Abbildung 32: Abschnitt 2 aus dem Flussdiagramm .....  | 40   |
| Abbildung 33: Gleichung 3-5, Erster Teil der Berechnung des vertikalen Amplitudenfaktors<br>für ein Einer-Antennenfeld.....              | 40   |
| Abbildung 34: Vertikales Antennendiagramm eines Einer-Antennenfeldes berechnet aus<br>Primärdaten des Antennenherstellers Kathrein ..... | 40   |
| Abbildung 35: Vertikales Diagramm eines Antennenfeldes .....   | 41   |
| Abbildung 36: Abschnitt 3 aus dem Flussdiagramm .....  | 41   |
| Abbildung 37: Gleichung 3-9, Vertikal polarisiertes, vertikales Antennendiagramm .....   | 42   |
| Abbildung 38: Gleichung 3-10, Vertikal polarisiert, horizontales Antennendiagramm.....   | 42   |
| Abbildung 39: Gleichung 3-10, „Vertikal“ polarisiert, die Antenne ist um $90^\circ$ geneigt.....   | 42   |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 40: Abschnitt 4 aus dem Flussdiagramm .....  | 43 |
| Abbildung 41: Anordnung der zwei horizontalen Dipole.....  | 55 |
| Abbildung 42: Vektorielle Addition.....  | 56 |
| Abbildung 43: Horizontales Antennendiagramm zweier horizontaler Dipole mit dem<br>Matlab-Programm .....                      | 57 |
| Abbildung 44: Horizontales Antennendiagramm zweier horizontaler Dipole nach Formeln<br>aus der Literatur, Gleichung 5-1..... | 57 |
| Abbildung 45: Horizontales Antennendiagramm.....   | 58 |
| Abbildung 46: Antennendiagramm berechnet mit Fourier-Koeffizienten .....   | 59 |
| Abbildung 47: Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit 1° Schritten .....  | 59 |
| Abbildung 48: Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit 10° Schritten und<br>lineare Interpolation .....              | 59 |
| Abbildung 49: Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit 10° Schritten und<br>lineare Interpolation .....              | 60 |
| Abbildung 50: Antennendiagramm berechnet mit Fourier-Koeffizienten .....   | 60 |
| Abbildung 51: Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit 1° Schritten .....  | 60 |
| Abbildung 52: Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit 10° Schritten und<br>lineare Interpolation .....              | 61 |
| Abbildung 53: Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit 1° Schritten .....  | 61 |
| Abbildung 54: Antennendiagramm berechnet mit Fourier-Koeffizienten .....   | 61 |
| Abbildung 55: Hubschraubermessung, 618 MHz, untere Halbantenne .....   | 62 |
| Abbildung 56: Simulation mit Matlab, Berechnet aus einer Tabelle in 1° Schritten, .....                                      | 62 |
| Abbildung 57: Simulation mit Matlab, .....   | 62 |
| Abbildung 58: Messaufbau.....  | 64 |
| Abbildung 59: Reflexion der Antenne.....   | 65 |
| Abbildung 60: Messaufbau S11 für die Charakterisierung des Splitters.....  | 66 |
| Abbildung 61: Reflexion des Splitters .....  | 67 |
| Abbildung 62: Messaufbau S21 für die Charakterisierung des Splitters.....  | 67 |
| Abbildung 63: Transmission des Splitters .....   | 68 |
| Abbildung 64: Anschlussplan für Messungen mit und ohne Phasenverschiebung.....   | 71 |
| Abbildung 65: Antennendiagramm der Quadantenne.....  | 72 |
| Abbildung 66: Darstellung der gemessenen Phase.....  | 73 |
| Abbildung 67: Interpolation der Phase .....  | 73 |
| Abbildung 68: Darstellung der gemessenen Phase im positiven Bereich der Phase .....  | 74 |
| Abbildung 69: Darstellung der gemessenen Phase ohne Sprünge .....  | 74 |
| Abbildung 70: Messaufbau.....  | 75 |
| Abbildung 71: Messaufbau in der Praxis .....   | 75 |
| Abbildung 72: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung .....  | 76 |
| Abbildung 73: Elektrischer Aufbau .....  | 76 |
| Abbildung 74: Messung des Antennendiagramms .....  | 77 |
| Abbildung 75: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 77 |
| Abbildung 76: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....                                    | 77 |
| Abbildung 77: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung .....  | 78 |
| Abbildung 78: Messung des Antennendiagramm.....  | 78 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 79: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 78  |
| Abbildung 80: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....      | 79  |
| Abbildung 81: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung .....                      | 79  |
| Abbildung 82: Messung des Antennendiagramms .....  | 80  |
| Abbildung 83: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 80  |
| Abbildung 84: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....      | 80  |
| Abbildung 85: Messung des Antennendiagramms .....  | 81  |
| Abbildung 86: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 81  |
| Abbildung 87: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....      | 81  |
| Abbildung 89: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung .....                      | 82  |
| Abbildung 88: Skizze zur Berechnung des Drehwinkels.....                                       | 82  |
| Abbildung 90: Messung des Antennendiagramms .....  | 83  |
| Abbildung 91: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 83  |
| Abbildung 92: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....      | 83  |
| Abbildung 93: Messung des Antennendiagramms .....  | 84  |
| Abbildung 94: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 84  |
| Abbildung 95: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....      | 84  |
| Abbildung 96: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung .....                      | 85  |
| Abbildung 97: Messung des Antennendiagramms .....  | 85  |
| Abbildung 98: Berechnung des Antennendiagramms.....  | 85  |
| Abbildung 99: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau.....      | 86  |
| Abbildung 100: Berechnung des Winkels B bzw. $\alpha$ .....                                    | 95  |
| Abbildung 101: Änderung der Winkel B und C .....   | 96  |
| Abbildung 102: Änderung der Winkel (Räumliche Darstellung) .....                               | 96  |
| Abbildung 103: Anwendungsbereich des Rückwärtskorrektur-Faktors .....                          | 97  |
| Abbildung 104: Vergleich von Dipolgleichungen .....  | 99  |
| Abbildung 105: Tabelle des Horizontalkorrekturfaktors .....                                    | 109 |
| Abbildung 106: Primärdaten des Antennentyps K 72 31 47 bei einer Frequenz von 550<br>MHz ..... | 113 |

## Tabellenverzeichnis:

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Berechnung der Einzelanteile der Dipole.....                                    | 25 |
| Tabelle 2: Übersicht über den Programmablauf des QuickBASIC -Programms .....               | 28 |
| Tabelle 3: Beispiel für den Aufbau der Matrix A, hier für zwei Spalten und eine Ebene..... | 29 |
| Tabelle 4: Beispiel für den Aufbau der Matrix D .....                                      | 30 |
| Tabelle 5: Vergleich der Phasenverschiebung der beiden Wege im Splitter.....               | 68 |
| Tabelle 6: Berechnung der relativen Phasenverschiebung auf den Messleitungen.....          | 69 |
| Tabelle 7: Vergleich der gemessenen mit der errechneten Phasenverschiebung.....            | 69 |
| Tabelle 8: Phasenverschiebung der Ausziehleitung.....                                      | 70 |
| Tabelle 9: Berechnung der Phasenverschiebung von Weg 1, gerader Splitterausgang .....      | 71 |
| Tabelle 10: Berechnung der Phasenverschiebung .....  | 71 |

## Begriffsdefinitionen

**Antennendiagramm:** Die in dieser Arbeit gezeigten Antennendiagramme sind auf eins normiert. Sie werden als Ortskurve in einem linearen Polardiagramm dargestellt. Die Horizontaldiagramme werden für  $\vartheta = 90^\circ$  berechnet, siehe Koordinatensystem Abbildung 1.

**Antennenelement:** Eine Rundfunk-Sendeantenne besteht meistens aus mehreren Antennenelementen. Die Antennenelemente sind üblicherweise in Zeilen und Spalten angeordnet. Antennenelemente können als Einzelstrahler oder als Antennenfeld ausgeführt sein.

**Zeile:** Befinden sich mehrere Antennenelemente einer Antenne auf gleicher Höhe nebeneinander, wird von einer Zeile gesprochen.

**Spalte:** Befinden sich mehrere Antennenelemente einer Antenne senkrecht übereinander, wird von einer Spalte gesprochen.

**Elementart:** Die Elementart gibt an, welcher Primär-Ausgangsdatensatz für die einzelnen Antennenelemente im Programm verwendet wird.

**Elementrichtung:** Die Elementrichtung beschreibt die mechanische Ausrichtung des Antennenelements in der Horizontalen

**Erhebungswinkel:** Der Erhebungswinkel ist der Winkel  $\vartheta$ , unter dem das Rechenprogramm das Antennendiagramm bestimmt.

**Neigungswinkel:** Der Neigungswinkel ist die mechanische Neigung eines einzelnen Antennenelementes in der Vertikalen.

**Primärdaten:** Die Primärdaten geben die Amplitude und die Phase einer Antenne in einer bestimmten Schrittweite an. Mit diesen Daten lässt sich das auf eins normierte Antennendiagramm darstellen. In der Regel werden die Primärdaten von den Herstellern angegeben. Die Phase ist nicht zwangsläufig Teil der Primärdaten.

**Rechenfrequenz:** Die Rechenfrequenz ist die Frequenz, die das Rechenprogramm zur Bestimmung des Gesamtdiagramms benutzt.

**Rückwärtskorrektur:** Faktor, um den die Amplitudenwerte im Halbraum hinter der Antenne kleiner sind als im Halbraum davor.

**Strahlrichtung:** Die Strahlrichtung gibt die Hauptstrahlrichtung des Antennenelementes an.

**Vertikaler und horizontaler Amplitudenfaktor:** Im QuickBASIC-Programm werden zur Erstellung des Antennendiagramms die Amplitudenfaktoren für jeden Winkel berechnet. Die Amplitudenfaktoren geben die Form des Antennendiagramms für das Einzelelement vor. Die Werte werden mit Hilfe von Gleichungen berechnet.

## Verwendete Formelzeichen

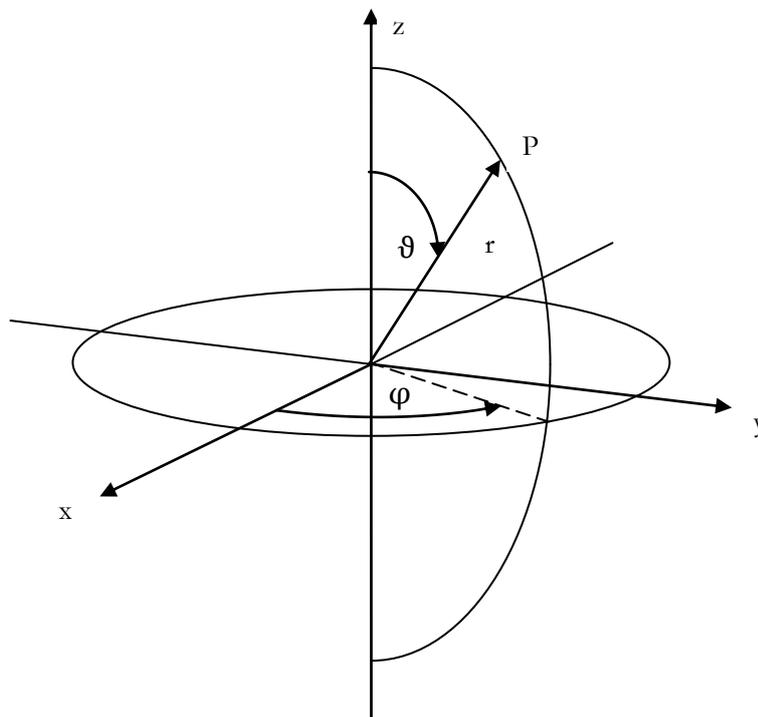


Abbildung 1: Das Koordinatensystem

Für die Berechnung von Antennen werden die Kugelkoordinaten  $r$ ,  $\vartheta$  und  $\varphi$  verwendet.

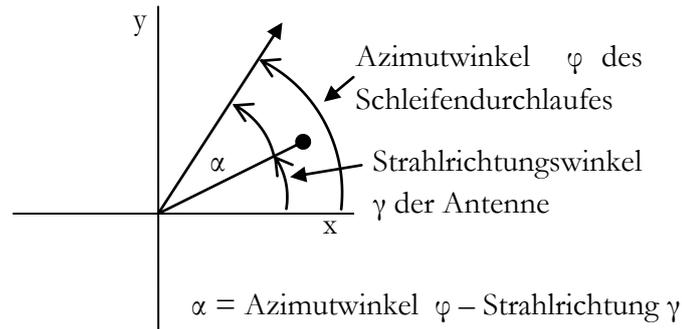
Die Bereiche von  $r$ ,  $\vartheta$  und  $\varphi$  sind wie folgt definiert:

- $r$  von 0 bis  $\infty$ ,
- $\vartheta$  von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ ,
- $\varphi$  von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$

**φ:** Allgemein beginnt der Azimutwinkel  $\varphi$  auf der x-Achse mit  $0^\circ$  und dreht gegen den Uhrzeigersinn in der x-y-Ebene.

**ϑ:** Der Erhebungswinkel  $\vartheta$  beginnt auf der z-Achse mit  $0^\circ$  und zählt bis  $180^\circ$ .

$\alpha$ : In dem Programm ist  $\alpha$  die Differenz zwischen Azimutwinkel und der Strahlrichtung der Antenne



**Abbildung 2: Berechnung des Winkels  $\alpha$**

$\beta$ : In dem Programm ist  $\beta$  die Differenz zwischen Erhebungswinkel und dem Neigungswinkel multipliziert mit dem Vorzeichen von  $(\cos(\beta))$

$\gamma$ : Strahlrichtung der Antenne

$\delta$ : Die gesamte Phasenverschiebung am Aufpunkt P,  $\delta = \delta_{\text{weg}} + \delta_0$

$\delta_{\text{weg}}$ : Die aus dem Wegunterschied resultierende Phasenverschiebung am Aufpunkt P

$\delta_0$ : Aus der Phasenverschiebung der Speiseströme resultierende Phasenverschiebung am Aufpunkt P

$l$ : Länge einer Dipolhälfte in Meter

$\lambda$ : Wellenlänge in Meter

$k$ : In der Literatur ist  $k$  ein gebräuchlicher Wert für  $1/\lambda$ .

$I_0$ : Speisestrom des Dipols.

$\hat{i}$ : Höchster möglicher Strom auf einem Dipol mit einer Länge von mindestens  $\lambda/2$ .

$\Delta z$ : Länge des Dipols,  $\Delta z = 2 \cdot l$

$Z_0$ : Wellenwiderstand des Freiraums

$d$ : Abstand der Dipole voneinander

### **Lesehinweise:**

Alle nicht mit Quellen versehenen Abbildungen und Tabellen wurden eigenständig erstellt.

## Vorwort

Der Mensch hat eine Reihe von Sinnen, um seine Umwelt wahrzunehmen. Er kann seine Umwelt sehen, hören, fühlen, riechen, schmecken und er kann Wärmestrahlung spüren. Zwei dieser Sinne reagieren auf elektromagnetische Strahlung, das sind Licht- und Wärmestrahlung.

Die Entwicklung einfacher Augen war im Kambrium (542 bis 488 Millionen Jahre) weitgehend abgeschlossen. Jäger konnten ihre Beute sehen und gezielt jagen, aber auch die Opfer sahen ihre Feinde und konnten fliehen. Die Evolution der Tiere machte einen gewaltigen Sprung. Er wird die Kambrische Explosion genannt.<sup>1</sup>

Licht und Wärmestrahlung kann der Mensch wahrnehmen, aber für den größten Teil des Spektralbereichs der elektromagnetischen Strahlung ist er blind. Die Evolution sah keine Notwendigkeit, die Lebewesen mit entsprechenden Rezeptoren auszustatten. Hier hat der moderne Mensch Abhilfe geschaffen. Mit der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Heinrich Hertz<sup>2</sup> im Jahre 1886 (Bericht 1888) war dieser erstmals in der Lage, elektromagnetische Wellen in anderen Spektralbereichen mit technischen Hilfsmitteln wahrzunehmen und selber zu erzeugen.

Die Vorhersage und Theorie der elektromagnetischen Wellen durch Maxwell<sup>3</sup> (1864-1865) wurde damit bestätigt. Hertz experimentierte bereits mit ersten Sende- und Empfangsantennen. Er entdeckte die Resonanz und entwickelte den Dipol.

So wie die Kambrische Explosion während der Evolution, machte jetzt die technische Entwicklung einen gewaltigen Sprung. Marconi<sup>4</sup> unternahm erste Anwendungsversuche und konnte bereits 1899 den Ärmelkanal mit Funksignalen überbrücken. 1901 gelang der Kontakt über den Atlantik. Zenneck<sup>5</sup> gelangen 1898 bis 1900 erste Funkkontakte von der Kugelbake in Cuxhaven zu Schiffen auf der Nordsee. Er gilt als Pionier der deutschen Funktechnik.

Sender, Empfänger und Antennen durchliefen in der Folgezeit eine rasante Entwicklung. Ab 1923 gab es den Rundfunk für Jedermann. Ohne Funktechnik ist unsere Gesellschaft kaum denkbar.

Heute sehen wir mit Parabolantennen, unseren neuen technischen Augen, bis in die Tiefen des Weltalls.

Die Entwicklung der Funktechnik ist jedoch bis heute nicht abgeschlossen. So ist zum Beispiel die Berechnung von Antennendiagrammen noch immer ein anspruchsvolles Thema.

---

<sup>1</sup> Ings, 2008, Seite 133

<sup>2</sup> Heinrich Rudolf Hertz, deutscher Physiker, \* 22. Februar 1857 in Hamburg, † 1. Januar 1894 in Bonn

<sup>3</sup> James Clerk Maxwell, schottischer Physiker, \* 13. Juni 1831 in Edinburgh, † 5. November 1879 in Cambridge

<sup>4</sup> Marchese Guglielmo Marconi, italienischer Physiker und Elektroingenieur, \* 25. April 1874 in Bologna, † 20. Juli 1937 in Rom

<sup>5</sup> Jonathan Zenneck, deutscher Physiker, \* 15. April 1871 in Ruppertshofen, † 8. April 1959 in München

# 1 Einleitung

Eine der Aufgaben des NDR ist es, für einen guten Empfang in seinem Sendebereich zu sorgen. Für eine optimale Abdeckung des Sendegebietes sind zahlreiche Sendemasten und Antennen erforderlich. Die Antennenhersteller entwerfen nach den Vorgaben des NDR die Sendeantennen. Hierfür berechnen diese das zu erwartende Antennendiagramm, um zu prüfen, ob die entworfene Konfiguration die Vorgaben erfüllt. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass dieses nicht immer der Fall war. Aus diesem Grund hat der NDR ein eigenes Programm zur Berechnung von Antennendiagrammen entwickelt. Dieses Programm ist Thema der Bachelorarbeit. Es soll analysiert und an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden.

Die Ergebnisse der Diagrammberechnungen des NDR mit diesem Programm sind u. A. Grundlage des Genehmigungsverfahrens für einen Sendemast. Aus diesem Grund kann im Voraus sichergestellt werden, dass die gesetzlichen Vorgaben z.B. bezüglich EMVU<sup>6</sup> erfüllt werden.

## 1.1 Aufgabenstellung und Spezifikation

Die Abteilung Sendertechnik des NDR benutzt zur Berechnung von Antennendiagrammen ein altes, selbst erstelltes Programm. Es ist in QuickBASIC geschrieben und stammt in seiner letzten Version ca. aus dem Jahr 1995. Begonnen wurde mit der Entwicklung Anfang der 80iger Jahre.

Die Entwickler sind seit einigen Jahren pensioniert und die Hintergründe und Ideen, die im Programm stecken, sind in Vergessenheit geraten. Daten der Antennenhersteller, die jetzt in einem neuen Format vorliegen, können daher nicht zur Berechnung herangezogen werden.

Der NDR wünschte sich ein neues Programm unter Verwendung einer aktuellen Programmiersprache und unter Einsatz inzwischen verbesserter Ausgangsdaten der Antennenhersteller. Bewährte Rechenschritte und Gleichungen des QuickBASIC Programms sollen weiterhin verwendet werden.

Zusammenfassende Spezifikation:

- Die Funktionalität des neuen Programms soll der des alten QuickBASIC-Programms entsprechen in Bezug auf die Berechnung von Antennendiagrammen
- Verwendung einer aktuellen Programmiersprache
- Verwendung bewährter Rechenschritte und Gleichungen
- Erweiterung der Funktionalität für die Verwendung verbesserter Herstellerdaten
- Erweiterungsmöglichkeit für eine neue Bedieneroberfläche und die Berechnung von Gewinn und Feldstärke

---

<sup>6</sup> EMVU: Elektromagnetische Verträglichkeit zur Umwelt, allgemein elektromagnetische Umweltverträglichkeit genannt

Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist es, das QuickBASIC Programm zu analysieren und in Matlab nachzubilden. Für die neuen Herstellerdaten soll das Programm erweitert werden. Außerdem soll das Programm experimentell und rechnerisch getestet werden.

Zur Bachelorarbeit gehört nicht die Erstellung einer Bedienungsoberfläche für das Programm. Dieses ist ein zukünftiges Ziel.

## 1.2 Vorgehensweise

- In Kapitel 2 werden die für die Bachelorarbeit erforderlichen theoretischen Grundlagen betrachtet.
- In Kapitel 3 erfolgt die Analyse des QuickBASIC Programms.
- In Kapitel 4 wird eine Nachbildung und Erweiterung des Programms in Matlab erarbeitet.
- In Kapitel 5 wird das Programm anhand von praktischen Messungen im Freifeld und Beispielen verifiziert.
- In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst und analysiert.

## 2 Theoretische Grundlagen

In Kapitel 2 wird auf grundlegende Eigenschaften und Gleichungen zur Berechnung von Strahlungsdiagrammen von Dipolanordnungen eingegangen.

### 2.1 Antennengrundlagen

Es seien  $\varphi$  und  $\vartheta$  wie folgt definiert:

Der Azimutwinkel  $\varphi$  dreht in der x-y-Ebene gegen den Uhrzeigersinn, mit  $0^\circ$  beginnend an der x-Achse.

Der Erhebungswinkel  $\vartheta$  beginnt auf der z-Achse bei  $0^\circ$  und läuft von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ .

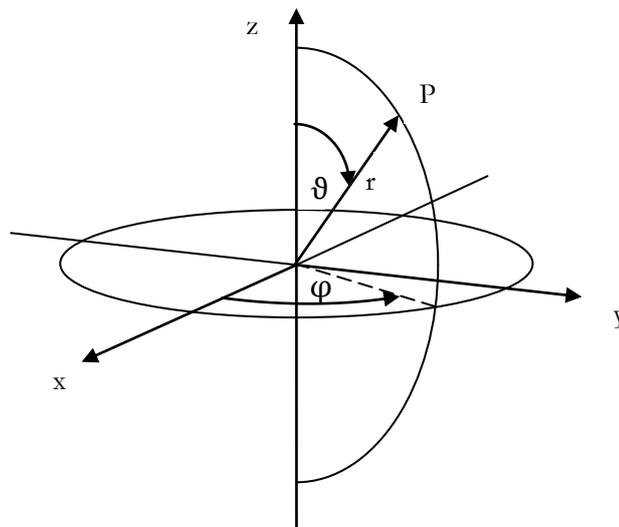


Abbildung 3: Koordinatensystem

In Anlehnung an den allgemeinen Gebrauch wird in den späteren Gleichungen  $1/\lambda = k$  gesetzt.

$$k = 1/\lambda$$

Die Dipollänge sei  $2l$ . Damit ist  $l$  die Länge einer Dipolhälfte in Meter.

$\lambda$  ist die Wellenlänge in Meter.

### Antennen

Eine Sendeantenne bewirkt den Übergang von einer leitungsgebundenen elektromagnetischen Welle zur Ausbreitung der Welle im freien Raum. Die Antenne arbeitet damit wie ein Anpassungstransformator zwischen dem Wellenwiderstand  $Z_L$  der Leitung und dem Wellenwiderstand des Raumes  $Z_0$ . Dieser Übergang ist umkehrbar. Daher sind Sende- und Empfangsantennen gleich aufgebaut.

Von den zahlreichen Antennenformen soll hier nur der Dipol betrachtet werden.

## Stromverteilung auf dem Dipol

Für die Wahl des Speisepunktes, in der Mitte oder am Ende des Dipols, ist es wichtig, die Stromverteilung zu kennen. In den folgenden Beispielen 1 ( $2l = 0,2\lambda$ ) und 2 ( $2l = 0,5\lambda$ ) auf Seite 5 erfolgt die Einspeisung in der Mitte des Dipols. Es handelt sich daher um stromgespeiste Dipole. Den  $\lambda/2$  Dipol aus Beispiel 2 auf Seite 5 könnte auch durch eine Spannungseinspeisung am Ende verwirklicht werden. Beispiel 3 auf Seite 6 ist ein in der Mitte spannungsgespeister Dipol.<sup>7</sup>

Im Folgenden wird die Stromverteilung auf dem Dipol betrachtet, da diese nicht konstant ist.

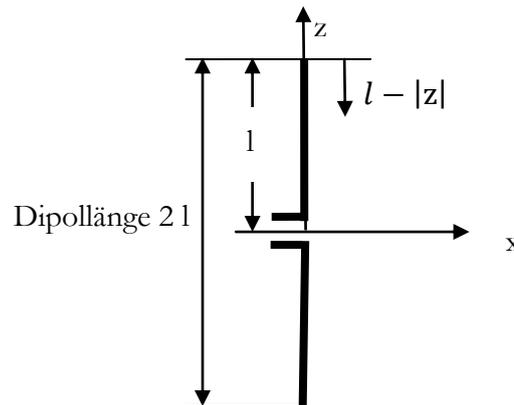


Abbildung 4: Skizze eines Dipols

Die Stromverteilung ist, von beiden Dipolenden beginnend, sinusförmig.

Die Gleichungen für die Stromverteilung lauten

$$\mathbf{I}(\mathbf{z}) = \hat{\mathbf{i}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} (l - |\mathbf{z}|)\right) \quad \text{Gleichung 2.1-1}^8$$

$\hat{\mathbf{i}}$  ist der höchste mögliche Strom auf einem Dipol mit einer Länge von mindestens  $\lambda/2$ .

Für  $z = 0$ , d.h. am Fußpunkt ist

$$\mathbf{I}_0 = \hat{\mathbf{i}} \cdot \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right) \quad \text{Gleichung 2.1-2}$$

$\mathbf{I}_0$  ist der Speisestrom des Dipols.

Für den  $\lambda/2$  Dipol vereinfacht sich die Gleichung ( $l=0,25\lambda$ )

$$\mathbf{I}_0 = \hat{\mathbf{i}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad \text{Gleichung 2.1-3}$$

Der Speisestrom  $\mathbf{I}_0$  des  $\lambda/2$  Dipols ist somit

$$\mathbf{I}_0 = \hat{\mathbf{i}} \quad \text{Gleichung 2.1-4}$$

<sup>7</sup> Vgl. Schöder, 1965, S. 489

<sup>8</sup> Kraft, 2008, S. 4

### Beispiele für einige Dipole

Im folgenden Abschnitt werden einige Stromverteilungen auf dem Dipol dargestellt.

1. Beispiel: Dipol mit der Länge  $2l = 0,2\lambda$ ,  $l = 0,1\lambda$ ,

Mit  $k = 1/\lambda$  d.h.  $k = 0,1$  ergibt sich nach Gleichung 2.1-2:

$$I_0 = \hat{i} \cdot \sin\left(2\pi \frac{0,1\lambda}{\lambda}\right)$$

$$I_0 = 0,5877 \hat{i}$$

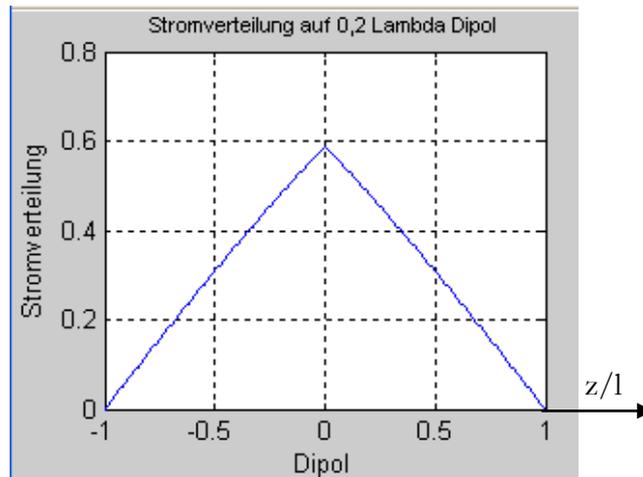


Abbildung 5: Stromverteilung auf einem Dipol der Länge  $0,2\lambda$   
X-Achse: Dipollänge in  $z/l$ , Y-Achse: Stromverteilung

Quellen: Eigene Darstellung mit Matlab

Der Dipol ist mit  $2l = 0,2\lambda$  kürzer als die Wellenlänge. Daher passt keine ganze Sinushalbwellenlänge auf den Dipol. Die Anfänge der Sinuskurve sind erkennbar.

2. Beispiel: Dipol mit der Länge  $2l = 0,5\lambda$ ,  $l = 0,25\lambda$

$k = 0,25$ , daraus ergibt sich nach Gleichung 2.1-2:

$$I_0 = \hat{i} \cdot \sin\left(2\pi \frac{0,25\lambda}{\lambda}\right)$$

$$I_0 = \hat{i}$$

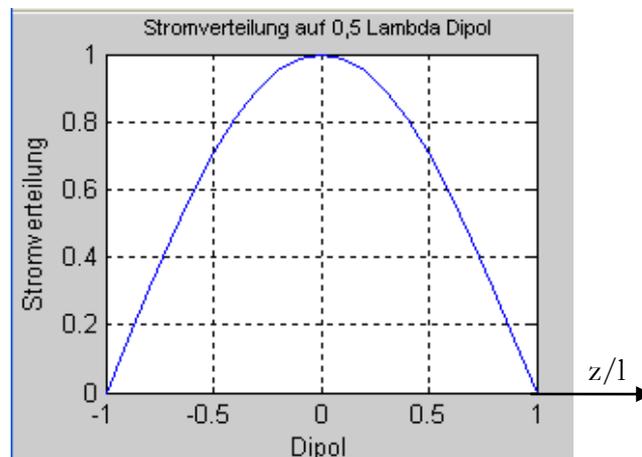


Abbildung 6: Stromverteilung auf einem Dipol der Länge  $0,5\lambda$   
X-Achse: Dipollänge in  $z/l$ , Y-Achse: Stromverteilung

Quellen: Eigene Darstellung mit Matlab

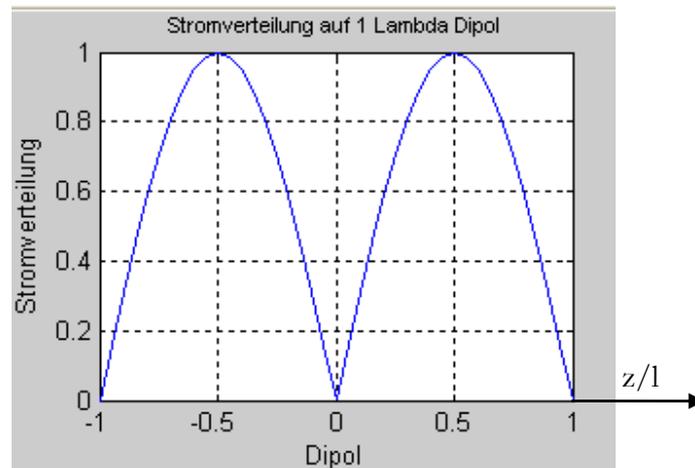
Der Dipol ist mit  $2l = 0,5 \lambda$  so lang wie eine halben Wellenlänge. Die sinusförmige Stromverteilung ist von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  erkennbar.

### 3. Beispiel: Dipol mit der Länge $2l = 1 \lambda, l = 0,5 \lambda$

$k = 0,5$ , daraus ergibt sich nach Gleichung 2.1-2:

$$I_0 = \hat{i} \cdot \sin\left(2\pi \frac{0,5 \lambda}{\lambda}\right)$$

$$I_0 = 0$$



**Abbildung 7: Stromverteilung auf einem Dipol der Länge  $1 \lambda$**   
**x-Achse: Dipollänge in  $z/l$ , y-Achse: Stromverteilung**

Quellen: Eigene Darstellung mit Matlab

Der Dipol ist mit  $2l = 1 \lambda$  so lang wie eine Wellenlänge. Die sinusförmige Stromverteilung ist zweimal von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ , von den Dipolenden beginnend, erkennbar.

## Antennengewinn

Reale Antennen strahlen bevorzugt in bestimmte Richtungen, sie haben eine Richtwirkung. Diese Richtwirkung kann über den Antennengewinn definiert werden. Zur Berechnung des Gewinns  $G$  wird die maximale Strahlungsdichte  $S_{\max}$  der zu vermessenden Antenne mit der Strahlungsdichte einer Bezugsantenne bei gleicher abgestrahlter Leistung  $P_s$  am gleichen Ort verglichen. Als Bezugsantenne wird in der Regel ein isotroper Kugelstrahler verwendet. Die Angabe erfolgt in dBi. Der Gewinn kann auch in dBd angegeben werden und ist damit auf den  $\lambda/2$  Dipol bezogen. Die abgestrahlte Leistung  $P_s$  des in der Praxis nicht realisierbaren Kugelstrahlers verteilt sich gleichmäßig auf einer Kugelfläche  $4 \pi r^2$

Die Strahlungsdichte  $S_i$  beträgt am Ort  $r$

$$S_i = \frac{P_s}{4 \pi r^2} \quad \text{Gleichung 2.1-5}^9$$

Der Gewinn einer Antenne im Bezug zum isotopen Strahler errechnet sich aus der Gleichung

$$G_i = \frac{S_{\max}}{S_i} \quad \text{Gleichung 2.1-6}^{10}$$

Wird Gleichung 2.1-5 in Gleichung 2.1-6 eingesetzt, ergibt sich

<sup>9</sup> Kark, 2004, S. 157

<sup>10</sup> Stirner, 1986, S.17

$$G_i = \frac{4 \pi r^2 S_{\max}}{P_s} \quad \text{Gleichung 2.1-7}^{11}$$

Angegeben wird der Antennengewinn logarithmisch in dBi. Der Index  $i$  steht für den isotropen Strahler als Bezugsantenne.

$$G_i [\text{dBi}] = 10 \log G_i \quad \text{Gleichung 2.1-8}^{12}$$

### Richtcharakteristik

Eine wichtige Eigenschaft einer Antenne ist die Richtcharakteristik. Das Abstrahl- und Empfangsverhalten in den Raumrichtungen  $\vartheta$  und  $\varphi$  wird durch die Richtcharakteristik  $C(\vartheta, \varphi)$  beschrieben.

Die Richtcharakteristik  $C(\vartheta, \varphi)$  lässt sich als Verhältnis der Feldstärken  $E(\vartheta, \varphi)$  an einem Aufpunkt zur maximalen Feldstärke  $E_{\max}$  angeben.

$$C(\vartheta, \varphi) = \frac{E(\vartheta, \varphi)}{E_{\max}} \quad \text{im Raum beim Abstand } r \quad \text{Gleichung 2.1-9}^{12}$$

Die Richtcharakteristik  $C$  ist dimensionslos und kann auf Grund der Normierung auf  $E_{\max}$  Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

## 2.2 Der Hertzsche Dipol

Der Hertzsche Dipol ist ein infinitesimal kurzer Dipol mit der Länge  $dz$  und konstanter Strombelegung, d.h.  $I$  ist konstant über die Länge  $dz$ .

Gangunterschiede (Phasendifferenzen) zum Empfängerpunkt  $P$  können wegen der punktförmigen Quelle der Strahlung in keiner Richtung auftreten.

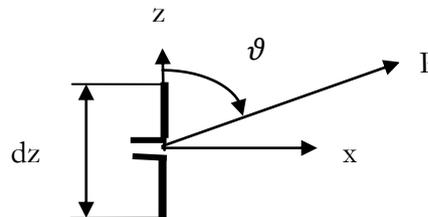


Abbildung 8: Hertzscher Dipol

Das elektrische Feld in Abhängigkeit von  $\vartheta$  (das Vertikaldiagramm ist von  $\varphi$  unabhängig) beträgt

$$\mathbf{E}(\vartheta) = \mathbf{j} \frac{2 \pi Z_0 I dz}{4 \pi r} \sin(\vartheta) \left( 1 + \frac{1}{j \frac{2 \pi}{\lambda} r} - \frac{1}{\left( \frac{2 \pi}{\lambda} \right)^2 r^2} \right) e^{-j \frac{2 \pi}{\lambda} r} \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-10}^{13}$$

$dz$  ist die Länge des Dipols

$Z_0$  ist der Wellenwiderstand im Vakuum

<sup>11</sup> Kark, 2004, S. 165

<sup>12</sup> Stirner, 1984, Seite 43

<sup>13</sup> Kraft, 2008, Seite 4

Im Fernfeld wird  $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ . Daher können die beiden hinteren Ausdrücke in der Klammer vernachlässigt werden.  $E_r$  geht im Fernfeld gegen null.  $E(\vartheta)$  hat eine Phase. Um das Maximum zu erhalten wird der phasenabhängige Faktor  $e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r}$  gleich 1 gesetzt.

Für den Hertzschen Dipol ergibt sich der Betrag für das Fernfeld

$$|\mathbf{E}(\vartheta)| = \frac{Z_0 I dz}{2 \lambda r} |\sin(\vartheta)| \quad [V/m] \quad \text{Gleichung 2.1-11}$$

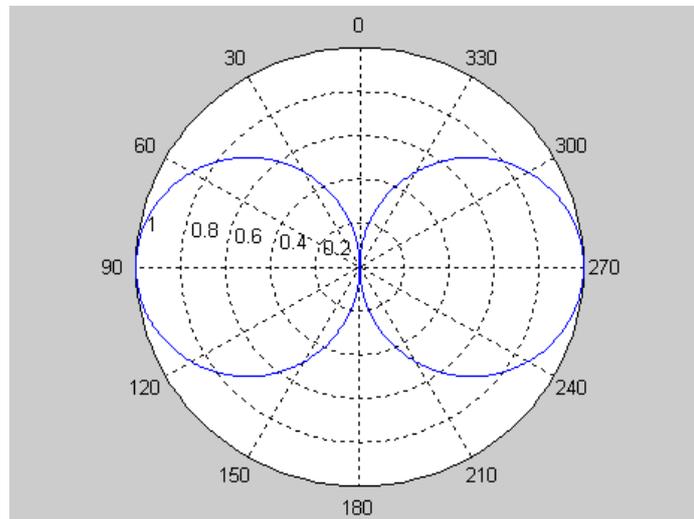
Die vertikale Richtcharakteristik des Hertzschen Dipols berechnet sich wie folgt

$$C(\vartheta) = \frac{|\mathbf{E}(\vartheta)|}{|\mathbf{E}_{\vartheta_{\max}}|} \quad \text{Gleichung 2.1-9}^{14}$$

$$C(\vartheta) = \frac{\left| \frac{Z_0 I dz}{2 \lambda r} \sin(\vartheta) \right|}{\left| \frac{Z_0 I dz}{2 \lambda r} \right|}$$

$$C(\vartheta) = |\sin(\vartheta)| \quad \text{Gleichung 2.1-12}$$

(dimensionslos, zwischen 0 und 1)



**Abbildung 9: Vertikale Charakteristik eines senkrechten Hertzschen Dipols**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Aus dem Vertikaldiagramm

$$\mathbf{E}(\vartheta) = \frac{Z_0 I dz}{2 \lambda r} \sin(\vartheta) \quad \text{Gleichung 2.1-11}$$

ergibt sich mit  $\vartheta = 90^\circ$  das Horizontaldiagramm auf x-y-Ebene

$$\mathbf{E}(\vartheta = 90^\circ) = \frac{Z_0 I dz}{2 \pi r} \quad [V/m] \quad \text{Gleichung 2.1-13}$$

Die horizontale Richtcharakteristik ist daher

$$C(\vartheta = 90^\circ) = \frac{\frac{Z_0 I dz}{2 \pi r}}{\frac{Z_0 I dz}{2 \pi r}}$$

$$C(\vartheta = 90^\circ) = 1 \quad \text{Gleichung 2.1-14}$$

<sup>14</sup> Stirner, 1984, Seite 43

## 2.3 Der reale Dipol

### Der senkrechte Dipol bzw. Z-Dipol als Beispiel für einen realen Dipol

Ein Dipol kann durch unendlich viele Hertzsche Dipole dargestellt werden. Ihre Einzelfeldstärken werden am Aufpunkt P nach Betrag und Phase zur Gesamtfeldstärke addiert.

Berücksichtigt werden müssen bei der Addition der Gangunterschied, der eine Phasendifferenz zwischen den abgestrahlten Wellen der Hertzschen Dipole verursacht und die sinusförmige Strombelegung auf dem realen Dipol. Jeder Hertzsche Dipol hat in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels  $\vartheta$  eine unterschiedliche Wegstrecke zum Punkt P und damit eine bestimmte Phasenlage. Auch wird der Strom für jeden Hertzschen Dipol zu den Enden des realen Dipols hin geringer.

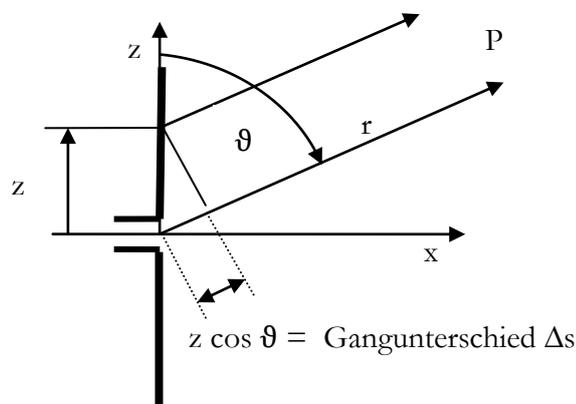


Abbildung 10: Realer Dipol, Skizze für den Gangunterschied

Durch Überlagerung der Felder aller Hertzschen Dipole der Länge  $dz$  und Lösen der sich daraus ergebenden Integralgleichung ergibt sich die Gleichung für das Diagramm des realen Dipols. Die Gangunterschiede und die sinusförmige Strombelegung müssen dabei berücksichtigt werden. Im Folgenden wird nur auf das Vertikaldiagramm eingegangen, da das Horizontaldiagramm kreisförmig ist.

Die Gleichung für das Vertikaldiagramm lautet

$$\mathbf{E}(\vartheta) = \frac{Z_0 \hat{I}}{2 \pi r} \frac{\cos\left(\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)\cos\vartheta\right) - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\sin\vartheta} \left[\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{m}}\right] \quad \text{Gleichung 2.1-15}^{15}$$

$Z_0$  ist der Wellenwiderstand im Vakuum,

$l$  ist Länge einer Dipolhälfte in Meter,

$\lambda$  ist die Wellenlänge in Metern.

Mit der Gleichung für den Speisestrom

$$\mathbf{I}_0 = \hat{I} \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \quad \text{Gleichung 2.1-16}$$

wird anstelle von  $\hat{I}$  der Speisestrom  $\mathbf{I}_0$  des Dipols in die Gleichung eingesetzt.

Die Gleichung für das Vertikaldiagramm lautet jetzt

<sup>15</sup> Kraft, 2008, S. 4

$$|\mathbf{E}(\vartheta)| = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \left| \frac{\cos\left(\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \cos \vartheta\right) - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \sin \vartheta} \right| \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-17}^{16}$$

Das Horizontaldiagramm bei  $\vartheta = 90^\circ$

$$|\mathbf{E}(\varphi)| = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \left| \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \right| \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-18}$$

Die horizontale Richtcharakteristik von  $C(\varphi)$  auf der x-y-Ebene

$$C(\varphi) = 1 \quad \text{Gleichung 2.1-19}$$

Es besteht keine Abhängigkeit von  $\varphi$ .

### Der senkrechte $\lambda/2$ Dipol

Für den  $\lambda/2$  Dipol beträgt  $k = 0,25$ . Die Gleichung 2.1-17 vereinfacht sich durch Einsetzen von  $l/\lambda = 0,25$  für den  $\lambda/2$  Dipol erheblich.

$$\mathbf{E}(\vartheta) = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-20}$$

Die vertikale Richtcharakteristik  $C(\vartheta)$  für den senkrechten  $\lambda/2$  Dipol errechnet sich durch Einsetzen der Gleichung 2.1-20 in Gleichung 2.1-21

$$C(\vartheta) = \frac{E(\vartheta)}{E_{\vartheta \max}} \quad \text{Gleichung 2.1-21}$$

Damit ergibt sich die Gleichung für die vertikale Richtcharakteristik

$$C(\vartheta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \quad \text{Gleichung 2.1-22}$$

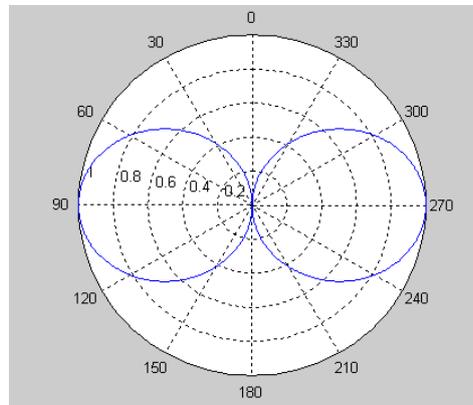


Abbildung 11: Vertikale Charakteristik eines senkrechten  $\lambda/2$  Dipols

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Für  $\vartheta = 90^\circ$  ergibt sich der Maximalwert zu

$$\mathbf{E}(\vartheta = 90^\circ) = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-23}$$

Das Horizontaldiagramm für einen  $\lambda/2$  Dipol errechnet sich durch Einsetzen von  $\vartheta = 90^\circ$  in Gleichung 2.1-20.

$$\mathbf{E}(\varphi) = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-24}$$

(konstant für alle  $\varphi$  Werte)

<sup>16</sup> Vgl. Kark, 2006, S. 244

Die horizontale Richtcharakteristik  $C(\varphi)$  für den senkrechten  $\lambda/2$  Dipol errechnet sich durch einsetzen der Gleichung 2.1-24 in Gleichung 2.1-21

$$\begin{aligned} C(\varphi) &= \frac{E(\varphi)}{E_{\varphi \max}} && \text{Gleichung 2.1-21 mit } \vartheta \text{ statt } \vartheta \\ C(\varphi) &= \frac{\frac{Z_0 I_0}{2 \pi r}}{\frac{Z_0 I_0}{2 \pi r}} \end{aligned}$$

Damit ergibt sich die Gleichung für die horizontale Richtcharakteristik  $C(\varphi)$

$$C(\varphi) = 1 \quad \text{Gleichung 2.1-25}$$

### Gleichungen für den horizontalen Dipol in der x-Achse bzw. x-Dipol

Aus der Gleichung für den vertikalen Dipol wird die Gleichung für den horizontalen Dipol, wenn  $\vartheta$  durch  $\varphi$  ersetzt wird, da lediglich eine Drehung des Dipols um  $90^\circ$  in die Horizontale erfolgt.

$$E(\varphi) = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \frac{\cos\left(\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \cos \varphi\right) - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \sin \varphi} \quad [\text{V/m}] \quad \text{Gleichung 2.1-26}^{17}$$

Die horizontale Richtcharakteristik  $C(\varphi)$  für den horizontalen Dipol ergibt durch einsetzen von  $\vartheta = 90^\circ$  in Gleichung 2.1-21 mit  $\varphi$  statt  $\vartheta$

$$C(\varphi) = \frac{\cos\left(\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \cos \varphi\right) - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \sin \varphi} \quad \text{Gleichung 2.1-27}$$

### Gleichungen für den horizontalen $\lambda/2$ Dipol

$l / \lambda = k = 0,25$

$$E(\varphi) = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r} \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \varphi\right)}{\sin \varphi} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}}\right] \quad \text{Gleichung 2.1-28}$$

Beispiele:

- Für  $\varphi = 0^\circ$  ist  $E_\varphi = 0$
- Für  $\varphi = 90^\circ$  ist  $E_\varphi = \frac{Z_0 I_0}{2 \pi r}$  (Maximalwert)

Die horizontale Richtcharakteristik  $C(\varphi)$  für  $\vartheta = 90^\circ$

$$C(\varphi) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \varphi\right)}{\sin \varphi} \quad \text{Gleichung 2.1-29}^{18}$$

<sup>17</sup> Vgl. Kraft, 2008, S. 4

<sup>18</sup> Kraft, 2008, S. 4

## 2.4 Antennen-Bauformen

Es gibt zahlreiche Antennen-Bauformen. Hier werden nur die folgenden Bauformen beschrieben:

- Der Dipol
- Der Faltdipol
- Die Yagi-Antenne
- Der Kreuzdipol
- Der Schmetterlingsdipol
- Der Batwing-Dipol
- Die Superturnstile-Antenne
- Die Quadantenne

### Der Dipol

Die Strahlungscharakteristik vom realen Dipol wurde bereits ausführlich in Kapitel 2.1.6 beschrieben.

Der Eingangswiderstand (Fußpunktimpedanz) beträgt ca.  $73\Omega$ . Als Empfangsantenne ist dieser Dipol daher wenig geeignet, da es keine symmetrischen Doppelleitungen mit passendem Wellenwiderstand gibt. Technisch am einfachsten wäre es, die Antenne mit einer symmetrischen Doppelleitung mit dem Empfänger zu verbinden. Koaxial-Leitungen haben den annähernd „richtigen“ Wellenwiderstand von  $50\Omega$ , erfordern dann aber ein Symmetrierglied, da Dipole symmetrisch und Koaxialleitungen unsymmetrisch sind. Für UKW Empfang wird daher der Faltdipol verwendet.<sup>19 20</sup>

### Der Faltdipol

Der Faltdipol ist ein einfacher Dipol mit einem parallel geschalteten zweiten  $\lambda/2$  Dipol.

Der zweite Dipol ist spannungsgekoppelt, d.h. die Dipole sind an ihren Spannungsmaxima verbunden.

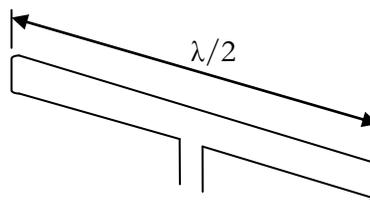


Abbildung 12: Faltdipol

Der Eingangswiderstand beträt ca.  $240\Omega$ . Hierfür gibt es symmetrische Leitungen. Daher hat sich der Faltdipol aus Kostengründen in der Anfangszeit des UKW-Empfangs als Empfangsantenne durchgesetzt.<sup>19</sup>

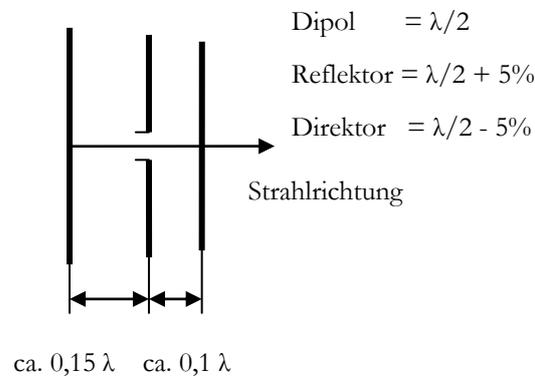
<sup>19</sup> Vgl. Schröder, 1965, S. 482 bis 562

<sup>20</sup> Vgl. Unger, 1994, S.45

## Die Yagi-Antenne

Eine Yagi-Antenne besteht aus einem Dipol und mehreren parallel zum Dipol angeordneten Direktoren und einem Reflektor. Ein Reflektorstab mit einer Länge von  $\lambda/2 + 5\%$  und einem Abstand von  $0,15 \lambda$  in Rückwärtsrichtung vom Dipol bewirkt eine Auslöschung in der Rückwärtsrichtung und eine Vordopplung in der Vorwärtsrichtung. Ein einzelner Stab kann dieses Optimum nicht erreichen. Ein Direktor mit einer Länge von  $\lambda/2 - 5\%$  und einen Abstand von  $0,1 \lambda$  in Strahlrichtung vor dem Dipol, bewirkt keine Auslöschung sondern eine Verstärkung der Strahlenintensität. Dieses wird als Direktorwirkung bezeichnet. Aus diesen Gründen lässt sich die Richtwirkung und damit der Antennengewinn durch Hinzufügen eines Reflektors und eines oder mehrerer Direktoren steigern. Es entsteht damit die Yagi-Antenne.

Ein typischer Anwendungsbereich ist der Fernsehempfang in den Frequenzbereichen VHF und UHF.<sup>21</sup>



**Abbildung 13: Dreielementige Yagi-Antenne**

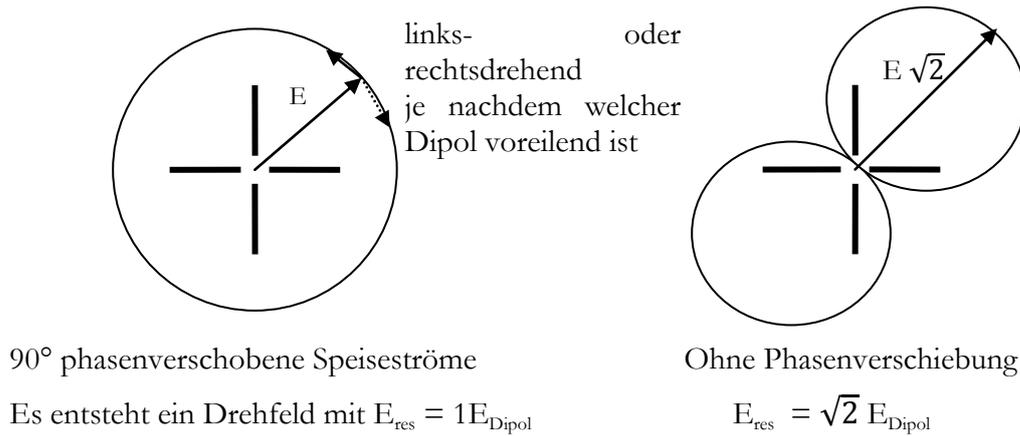
Quelle: Darstellung angelehnt an Schröder, 1965, S. 555

## Der Kreuzdipol

Im Englischen wird diese Antenne „turnstile antenna“ genannt, also Drehkreuzantenne. Oft sollen Antennen gleichmäßig in alle Richtungen strahlen oder rundherum empfangen. Dieses Ziel lässt sich mit zwei gekreuzten Dipolen erreichen. Die beiden Speiseströme müssen hierfür um eine Viertelperiode ( $90^\circ$ ) verschoben sein. Das resultierende Feld ist ein Drehfeld. Es dreht mit der Frequenz des Trägers. Das Ergebnis ist eine zirkulare Polarisation in Richtung senkrecht zu den Dipolen. Die  $90^\circ$  Verschiebung ist durch eine zusätzliche  $\lambda/4$ -Leitung in der Speiseleitung eines Dipols erreichbar.

Ohne  $90^\circ$  Phasenverschiebung entsteht in den Diagonalen der Dipole ein Feld mit  $\sqrt{2}$  facher Amplitude.<sup>21</sup>

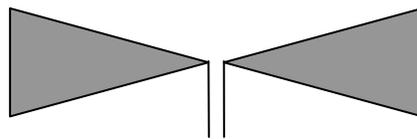
<sup>21</sup> Vgl. Schröder, 1965, S. 482 bis 562

**Abbildung 14: Kreuzdipol**

Quelle: Darstellung angelehnt an Schröder, 1965, S. 562

### Der Schmetterlingsdipol (Spreizdipol)

Schmetterlingsdipol ist die Übersetzung aus dem Englischen, er wird dort „butterfly antenna“ genannt. Der korrekte deutsche Name ist Spreizdipol oder Flächendipol.

**Abbildung 15: Spreizdipol**

Physikalisch gesehen handelt es sich um einen Dipol mit Dachkapazitäten. Dachkapazitäten sind Flächen, die am Ende einer Antenne angebracht werden, um sie elektrisch zu verlängern.

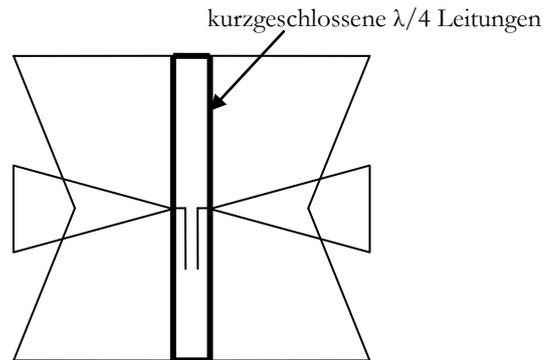
Der Spreizdipol ist eine Antenne für Breitbandanwendungen. Sie wird z.B. für VHF und UHF-Fernsehempfang verwendet.<sup>22 23 24</sup>

<sup>22</sup> Vgl. Rothammel, Kruschke, 2002, S. 274

<sup>23</sup> Vgl. Schröder, 1965, S. 482 bis 562

<sup>24</sup> Vgl. Unger, 1994, S. 79

## Der Batwing-Dipol



**Abbildung 16: Batwing-Dipol**

Aus dem Spreizdipol wurde der Batwing-Dipol entwickelt. Durch Anschließen zweier an den Enden kurzgeschlossener  $\lambda/4$  Leitungen und Auffüllen der dazwischen liegenden Flächen wird aus dem Spreizdipol der Batwing-Dipol.

Um eine Rundstrahlcharakteristik zu erhalten, werden zwei Batwing-Dipole wie ein Kreuzdipol zusammengesetzt und mit einer Phasendifferenz von  $90^\circ$  gespeist. Es entsteht eine zirkulare Polarisation in der Draufsicht von Abbildung 16. Durch Vertauschen der Phasenverschiebung auf den anderen Dipol lässt sich der Drehsinn ändern.

Häufig wird der Batwing-Dipol als Sendeantenne für Fernsehkanäle verwendet.<sup>25</sup>

## Die Superturnstile-Antenne

In der Praxis werden zwei oder mehrere gekreuzte Batwing-Dipole übereinandergesetzt. Dieses vergrößert die Richtwirkung. Ein Paar hat dabei eine linksdrehende und ein Paar eine rechtsdrehende zirkulare Polarisation. Diese Antennenbauform hat den Namen Superturnstile-Antenne.<sup>26</sup>



**Abbildung 17: Superturnstile-Antenne**

Quelle: Kathrein Katalog

<sup>25</sup> Vgl. Rothammel, Kruschke, 2002, S. 276

<sup>26</sup> Vgl. Schröder, 1965, S. 560

## Die Quadranterenne

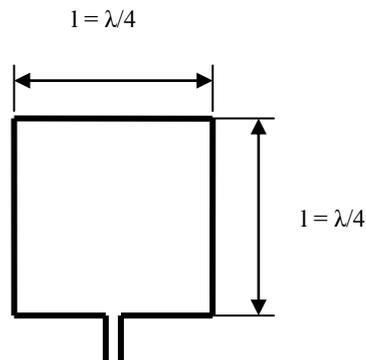


Abbildung 18: Quadranterenne

Die Quadranterenne gehört wie die Ferritantenne und die Rahmenantenne zu den magnetischen Antennen. Diese Antennen empfangen die magnetische Komponente der elektromagnetischen Strahlung.

Durch ihre geschlossene Bauform reagiert sie weniger empfindlich auf elektrostatische Entladungen. Die Drahtlänge der Quadranterenne ist gleich einer Wellenlänge  $\lambda$ . Es handelt sich daher um eine Ganzwellenschleife.

Die Polarisation ist vom Einspeisepunkt abhängig. Erfolgt die Einspeisung, wie in Abbildung 18 dargestellt ist, unten, ist die Polarisation horizontal. Bei seitlicher Einspeisung wird eine vertikale Polarisation erreicht. Das horizontale Richtdiagramm entspricht zweier sich berührender Kreise, es hat die Form einer Acht.

Reflektoren und Direktoren sind auch bei dieser Antennenform möglich. Die Richtcharakteristik kann damit in eine Richtung gebündelt werden, womit der Antennengewinn steigt.<sup>27 28</sup>

<sup>27</sup> Vgl. Rothammel, Krischke, 2002, S. 322

<sup>28</sup> Vgl. Schröder, 1965, S. 546

## 2.5 Kombinationen von Dipolantennen

In diesem Absatz werden zwei unterschiedliche Wege zur Berechnung des Gruppenfaktors von Gruppenantennen nacheinander vorgestellt und in einem Beispiel miteinander verglichen. Mit dem Vergleich wird gezeigt, dass der Weg, der später für das Matlab-Programm verwendet wird, zum gleichen Ergebnis kommt wie der Weg mit Gleichungen aus der Literatur. Vorher werden die allgemeinen Gleichungen dargestellt und die Wege zur Berechnung erklärt.

### Allgemeines zu Dipolgruppen

Werden Dipole zu Gruppen zusammengefasst, überlagern sich die Felder der einzelnen Dipole. Durch die Interferenz entsteht die Richtwirkung der Gruppe. Es können die Einzeldipole mit unterschiedlicher Amplitude und Phasenlage gespeist werden. Die Richtwirkung lässt sich so unabhängig von der Geometrie beeinflussen.

Die Einflußgrößen der resultierenden Charakteristik sind:

- Die Charakteristik des Einzelstrahlers
- Die Anordnung der Einzelstrahler (Geometrie)
- Die Amplituden der Speiseströme
- Die relative Phase der Speiseströme

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Wege, das Antennendiagramm zu berechnen:

Weg 1: Anwendung der Gleichungen aus der Literatur zur analytischen Bestimmung des Gruppenfaktors, siehe 2.5.2.1.

Weg 2: Addition der Vektoren der einzelnen Dipole zur Berechnung des Gruppenfaktors, siehe Kapitel 2.5.2.2.

### Verwendete Formelzeichen für den folgenden Abschnitt:

$N$  ist die Anzahl der Strahler in der Gruppe

$n = 1, 2, 3, \dots, N$  ist die laufende Nummer der Einzelstrahler

$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} r$  ist der Phasenwinkel im Abstand  $r$

$E_p$  ist die Feldstärke am Aufpunkt  $P$  allgemein

$E_E$  ist die Feldstärke eines Einzelstrahlers am Aufpunkt  $P$

$E_n$  ist die Feldstärke des  $n$ -ten Strahlers einer Gruppe am Aufpunkt  $P$

$r_n$  ist der Radius vom  $n$ -ten Strahler zum Aufpunkt  $P$

$r_0$  ist der Radius vom Bezugspunkt der Strahlergruppe zum Aufpunkt  $P$

$r_n - r_0$  ist der Gangunterschied des  $n$ -ten Strahlers zum Aufpunkt  $P$

$C_E$  ist die Charakteristik eines einzelnen Antennenelementes

$C_{Gr}$  ist die Charakteristik der Antennengruppe, unabhängig von der Art des Einzelstrahlers

$C_{ges}$  ist die Gesamtcharakteristik der Antennengruppe

$F_E$  ist der Elementfaktor, er ist abhängig von der Art des Einzelstrahlers und dem Speisestrom  $I_0$

$F_{Gr}$  ist der Gruppenfaktor, er ist abhängig von der Phasendifferenz der einzelnen Dipole

$F_A$  ist der Abstandsfaktor, er ist abhängig vom Abstand  $r_0$

### Allgemeine Gleichungen zur analytischen Bestimmung des Antennendiagramms einer Dipolgruppe

Die Gesamtcharakteristik  $C_{\text{ges}}$  der Gruppe ergibt sich als Produkt aus der Einzelcharakteristik des Dipols  $C_E$  und der Gruppencharakteristik  $C_{\text{Gr}}$ .

$$\mathbf{C}_{\text{ges}} = \mathbf{C}_E \cdot \mathbf{C}_{\text{Gr}} \quad \text{Gleichung 2.3-1}^{29}$$

Wird die Gruppencharakteristik mit der Anzahl  $n$  der Dipole multipliziert, ergibt sich der Gruppenfaktor  $F_{\text{Gr}}$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \mathbf{C}_{\text{Gr}} \cdot \mathbf{n} \quad \text{Gleichung 2.3-2}^{30}$$

Die Feldstärke am Aufpunkt P ist das Produkt aus der Feldstärke des Einzeldipols und dem Gruppenfaktor  $F_{\text{Gr}}$ .

$$\mathbf{E}_P = \mathbf{E}_E \cdot \mathbf{F}_{\text{Gr}} \quad \text{Gleichung 2.3-3}^{31}$$

Die Feldstärke des Einzelstrahlers  $E_E$  setzt sich aus dem Elementfaktor  $F_E$  und dem Abstandsfaktor  $F_A$  zusammen.

$$\mathbf{E}_E = \mathbf{F}_E \cdot \mathbf{F}_A \quad \text{Gleichung 2.3-4}^{27}$$

### Der Gruppenfaktor $F_{\text{Gr}}$

Die Felder der einzelnen Strahler überlagern sich im freien Raum vektoriell.

Die Feldstärke am Aufpunkt P ergibt sich durch vektorielle Addition der Einzelfeldstärken  $E_n$

$$\vec{\mathbf{E}}_P = \sum_{n=1}^N \vec{\mathbf{E}}_n(\varphi_n, \vartheta_n, r_n) \quad \text{Gleichung 2.3-5}^{32}$$

Die individuellen Werte der Einzelstrahler  $\varphi_n$ ,  $\vartheta_n$ ,  $r_n$  können in großer Entfernung am Aufpunkt P alle gleich  $\varphi_0$ ,  $\vartheta_0$ ,  $r_0$  gesetzt werden. Die Phasendifferenz der einzelnen Dipole findet ihre Berücksichtigung in der komplexen e-Funktion mit  $r_n$ .

Unter den Voraussetzungen

- Alle Strahler haben die gleiche Charakteristik  $C_E$
- Die Speiseströme aller Strahler sind gleich
- Die Abstände der Strahler zueinander sind gleich

lautet die Gleichung für das Fernfeld

$$\vec{\mathbf{E}}_P = \sum_{n=1}^N \vec{\mathbf{E}}(\varphi_0, \vartheta_0) \frac{1}{r_0} e^{\frac{-j2\pi r_n}{\lambda}} \quad \text{Gleichung 2.3-6}^{28}$$

Dabei berücksichtigt  $e^{\frac{-j2\pi r_n}{\lambda}}$  die Phasendifferenz zwischen dem Dipol und Aufpunkt P und  $\frac{1}{r_0}$  berücksichtigt die Entfernung zum Aufpunkt P.

In der komplexen e-Funktion  $r_n$  wird jetzt durch die individuellen Gangunterschiede  $(r_n - r_0)$  der Einzelstrahler zum Aufpunkt P ersetzt und alle von  $n$  unabhängigen Größen werden vor das Summenzeichen gezogen.

<sup>29</sup> Kark, 2006, S.269

<sup>30</sup> Wiesbeck, S. 76

<sup>31</sup> vgl. Wiesbeck S.71

<sup>32</sup> Wiesbeck, S. 70

$$\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{P}} = \vec{\mathbf{E}}(\varphi_0, \vartheta_0) \frac{1}{r_0} \sum_{n=1}^N e^{\frac{-j2\pi(r_n - r_0)}{\lambda}} \quad \text{Gleichung 2.3-7}^{27}$$

$$\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{P}} = \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{Gr}} \quad \text{Gleichung 2.3-8}^{27}$$

Die Gleichung besteht aus drei Faktoren:

- $F_{\mathbf{E}}$  ist der Elementfaktor, er ist abhängig von der Art des Einzelstrahlers und dem Speisestrom  $I_0$
- $F_{\mathbf{A}}$  ist der Abstandsfaktor, er ist abhängig vom Abstand  $r_0$
- $F_{\mathbf{Gr}}$  ist der Gruppenfaktor, er ist abhängig von der Phasendifferenz der einzelnen Dipole verursacht durch ihre geometrischen Anordnung, von der Art der verwendeten Einzelstrahler ist er unabhängig

$$\underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{Gr}} = \sum_{n=1}^N e^{\frac{-j2\pi(r_n - r_0)}{\lambda}} \quad \text{Gleichung 2.3-9}^{33}$$

$E_{\mathbf{E}}$  ist die Feldstärke eines einzelnen Strahlers am Aufpunkt P

$$\underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{E}} = \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{A}} \quad \text{Gleichung 2.3-10}^{34}$$

Die Feldstärke aller Strahler am Aufpunkt P ist

$$\underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{P}} = \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{Gr}} \quad \text{Gleichung 2.3-8}^{35}$$

### 2.5.1 Herleitung der Gleichungen für Dipolgruppen

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten der Anordnung (Geometrie) von Antennen. Im Folgenden werden drei Anordnungen näher untersucht. Die Einspeisung der Dipole ist in allen Fällen gleichphasig.

#### 1. Gruppenfaktor für eine Dipolgruppe mit senkrechten Dipolen in x-Richtung

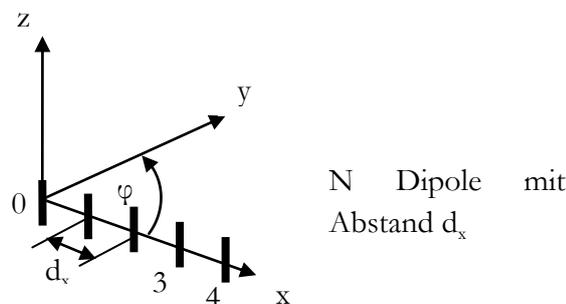


Abbildung 19: Senkrechte Dipole in x-Richtung

Ausgehend von der Gleichung 2.3-9 wird der Gruppenfaktor dieser Dipolgruppe bestimmt.

$n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$  ist die laufende Nummer der Einzelstrahler.

In diesem Abschnitt wird  $n$  von 0 beginnend gezählt.

$$\underline{\mathbf{F}}_{\mathbf{Gr}} = \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{-j2\pi(r_n - r_0)}{\lambda}} \quad \text{Gleichung 2.3-11}^{36}$$

<sup>33</sup> vgl. Wiesbeck S.71

<sup>34</sup> Kark, 2006, S. 271

<sup>35</sup> vgl. Wiesbeck S.71

Es folgt die Berechnung der Gangunterschiede der Einzelstrahler zum Aufpunkt P.

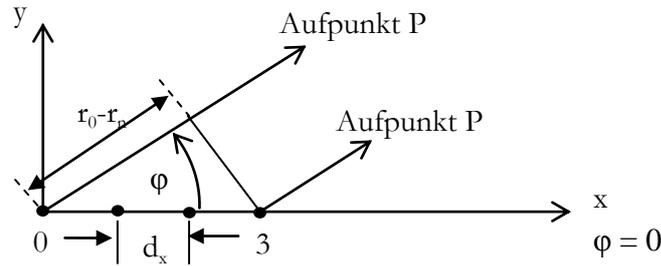


Abbildung 20: Wegdifferenz der Dipole zum Aufpunkt P

Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Kark, 2004, S. 288

Der Anteil des Gangunterschiedes in der Horizontalen ist  $(r_n - r_0) = -n d_x \cos \varphi$ .

Dieser Wert muss noch mit  $\sin \vartheta$  multipliziert werden, um den Winkel  $\vartheta$  zu berücksichtigen.

$$(r_n - r_0) = -n d_x \cos \varphi \sin \vartheta \quad \text{Gleichung 2.3-12}^{37}$$

Eingesetzt in die Gleichung 2.3-9 ergibt sich

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \sum_{n=0}^{N-1} e^{+j \frac{2\pi}{\lambda} n d_x \cos \varphi \sin \vartheta} \quad \text{Gleichung 2.3-13}^{38}$$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \sum_{n=0}^{N-1} (e^{+j \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \varphi \sin \vartheta})^n \quad \text{Gleichung 2.3-14}^{38}$$

$(\frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \varphi \sin \vartheta)$  wird gleich  $\delta$  gesetzt

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \sum_{n=0}^{N-1} (e^{j \delta})^n \quad \text{Gleichung 2.3-15}^{38}$$

Durch die Verwendung einer geometrischen Reihe über die Anzahl der Elemente kann eine Vereinfachung vorgenommen werden. Die Summe über die Anzahl der Elemente entfällt und damit ergibt sich

$$\sum_{n=0}^{N-1} q^n = \frac{1-q^N}{1-q} \quad \text{Gleichung 2.3-16}^{38}$$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \frac{1-e^{jN\delta}}{1-e^{j\delta}} \quad \text{Gleichung 2.3-17}^{38}$$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \frac{e^{jN\frac{\delta}{2}} (e^{j\frac{\delta}{2}} - e^{-jN\frac{\delta}{2}})}{e^{j\frac{\delta}{2}} (e^{j\frac{\delta}{2}} - e^{-j\frac{\delta}{2}})} \quad \text{Gleichung 2.3-18}^{38}$$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = \frac{e^{jN\frac{\delta}{2}} \sin(N\frac{\delta}{2})}{e^{j\frac{\delta}{2}} \sin(\frac{\delta}{2})} \quad \text{Gleichung 2.3-19}^{38}$$

Für  $\delta$  wird wieder  $(\frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \varphi \sin \vartheta)$  eingesetzt und der Betrag gebildet.

$$|\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta)| = \left| \frac{\sin(\frac{N}{2}(2\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta))}{\sin(\frac{1}{2}(2\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta))} \right| \quad \text{Gleichung 2.3-20}^{39}$$

<sup>36</sup> Kark, 2006, S. 271

<sup>37</sup> Wiesbeck, S. 73

<sup>38</sup> Kark, 2006, S. 271

<sup>39</sup> Wiesbeck, S. 74

Nach dem Kürzen entsteht die allgemeine Gleichung für die Bestimmung des Gruppenfaktors und der Gruppencharakteristik

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(N \pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-21}$$

Die Gruppencharakteristik erhält man mit der Gleichung

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}} = \frac{\mathbf{F}_{\text{Gr}}}{N} \quad \text{Gleichung 2.3-22}^{40}$$

Die Gruppencharakteristik ergibt sich nach einsetzen von Gleichung 2.3-21 in Gleichung 2.3-22

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{1}{N} \frac{[\sin(N \pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)]}{\sin(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-23}$$

Für den Sonderfall von zwei Dipolen ( $N = 2$ ) vereinfacht sie die Gleichung 2.3-23 weiter

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(2 \pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-24}$$

Wird die Beziehung

$$\frac{\sin x}{\sin \frac{x}{2}} = 2 \cos \frac{x}{2} \quad \text{Gleichung 2.3-25}$$

auf die Gleichung 2.3-24 angewendet, folgt für den Gruppenfaktor einer Dipolgruppe mit zwei senkrechten Dipolen in x-Richtung

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = 2 \cos(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta) \quad \text{Gleichung 2.3-26}$$

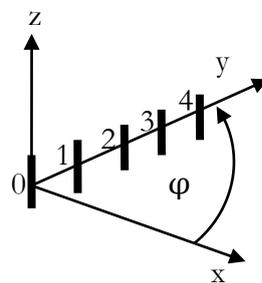
Die Gruppencharakteristik für den Sonderfall zweier Dipole ergibt sich mit Gleichung 2.3-23

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{2}{N} \cos(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta) \quad \text{Gleichung 2.3-24}$$

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{2}{2} \cos(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta)$$

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \cos(\pi \frac{d_x}{\lambda} \cos \varphi \sin \vartheta) \quad 41$$

## 2. Gruppenfaktor für eine Dipolgruppe mit senkrechten Dipolen in y-Richtung



N Dipole mit dem Abstand d

Abbildung 21: Senkrechte Dipole in y-Richtung

<sup>40</sup> Wiesbeck, S. 76

<sup>41</sup> Wiesbeck, S. 77

Die Gleichung für die Dipolgruppe in y-Richtung erhält man analog zur Gleichung 2.3-21

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(N \pi \frac{d_y}{\lambda} \sin \varphi \sin \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_y}{\lambda} \sin \varphi \sin \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-21}^{42}$$

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\mathbf{F}_{\text{Gr}}}{N} \quad \text{Gleichung 2.3-22}^{43}$$

Die Gruppencharakteristik ist daher

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{1}{N} \frac{\sin(N \pi \frac{d_y}{\lambda} \sin \varphi \sin \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_y}{\lambda} \sin \varphi \sin \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-27}$$

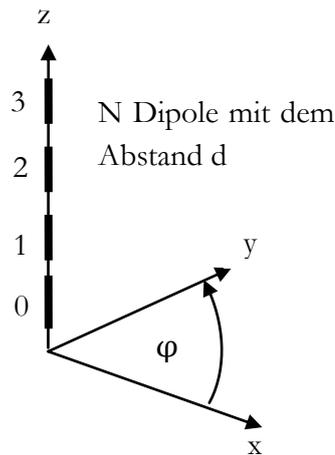


Abbildung 22: Senkrechte Dipole in z-Richtung

### 3. Gleichung für den Gruppenfaktor einer Dipolgruppe in z-Richtung

Für die Gleichung der Dipolgruppe in z-Richtung entfällt in der Gleichung 2.3-21 auf Grund der Symmetrie  $\sin \varphi$ .

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(N \pi \frac{d_z}{\lambda} \cos \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_z}{\lambda} \cos \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-21}^{44}$$

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\mathbf{F}_{\text{Gr}}}{N} \quad \text{Gleichung 2.3-22}^{37}$$

Die Gruppencharakteristik ist daher

$$\mathbf{C}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{1}{N} \frac{\sin(N \pi \frac{d_z}{\lambda} \cos \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_z}{\lambda} \cos \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-28}$$

<sup>42</sup> Wiesbeck S. 74

<sup>43</sup> Wiesbeck, S. 76

<sup>44</sup> Wiesbeck, S. 74

## 2.5.2 Vergleich von zwei Rechenwegen zur Bestimmung des Antennendiagramms

In den folgenden Beispielen wird gezeigt, dass beide Wege – Verwendung der analytischen Gleichung und Berechnung durch Addition der Einzelvektoren – zur Bestimmung des Gruppenfaktors von Dipolgruppen zum gleichen Ergebnis kommen.

### 2.5.2.1 Weg 1: Gleichungen zur analytischen Bestimmung des Antennendiagramms

#### Beispiel: Berechnung des Gruppenfaktors mit der analytischen Gleichung

Betrachtet wird eine vertikale Dipolgruppe mit  $N = 8$  Dipolen.

$\lambda = 3$  m ist die Wellenlänge

$\beta = 5^\circ$  ist der Winkel zum Aufpunkt P gegenüber der Waagerechten (Erhebungswinkel)

$\vartheta = 90^\circ + \beta = 95^\circ$  ist der Winkel zum Aufpunkt P gegenüber der Senkrechten

$d_z = 1$  m ist der Abstand der Dipole

Die Gleichung für die vertikale Dipolgruppe wurde im Abschnitt 2.5.1 unter Punkt 3 hergeleitet.

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(N \pi \frac{d_z}{\lambda} \cos \vartheta)}{\sin(\pi \frac{d_z}{\lambda} \cos \vartheta)} \quad \text{Gleichung 2.3-34}$$

Nach Einsetzen der gegebenen Werte ergibt sich

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(8 \cdot 180^\circ \frac{1}{3} \cos 95^\circ)}{\sin(180^\circ \frac{1}{3} \cos 95^\circ)}$$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = \frac{\sin(-41,83^\circ)}{\sin(-5,229^\circ)}$$

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}}(\varphi, \vartheta) = 7,318$$

Am Ende des Kapitels wird dieses Ergebnis aus Weg 1 mit dem Ergebnis aus Weg 2 verglichen.

### 2.5.2.2 Weg 2: Addition der Vektoren zur Bestimmung des Antennendiagramms

Jeder Einzeldipol hat am Aufpunkt P durch die unterschiedliche Wegstrecke einen anderen Feldvektor. Durch getrennte Addition von Real- und Imaginärteilen aller Vektoren ergibt sich die resultierende Feldstärke.

#### Beispiel: Berechnung des Gruppenfaktors mit phasenrichtiger Addition

Betrachtet wird eine vertikale Dipolgruppe mit  $N = 8$  Dipolen.

$\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\vartheta$  und  $d$  sind wie in dem vorangegangenen Beispiel gewählt

$A$  ist der Betrag der Feldstärkevektoren der Einzelelemente

$n$  ist die laufende Nummer des Dipols

Um die vektorielle Addition durchzuführen zu können, muss die jeweilige Phase der Dipole am Aufpunkt P bekannt sein. Dieses kann man mit Hilfe des Gangunterschiedes  $\Delta s$  der Ausbreitungswege errechnen. Für eine vertikale Dipolgruppe errechnet sich die Strecke  $\Delta s$  für das  $n$ -te Dipolelement mit

$$\Delta s = \left[ \frac{N+1}{2} - n \right] d \sin \beta$$

Gleichung 2.3-21 <sup>45</sup>

Daraus kann das Phasenmaß  $\delta$  bestimmt werden

$$\text{Phasenmaß } \delta = \frac{\Delta s \cdot 2\pi}{\lambda}$$

Gleichung 2.3-22

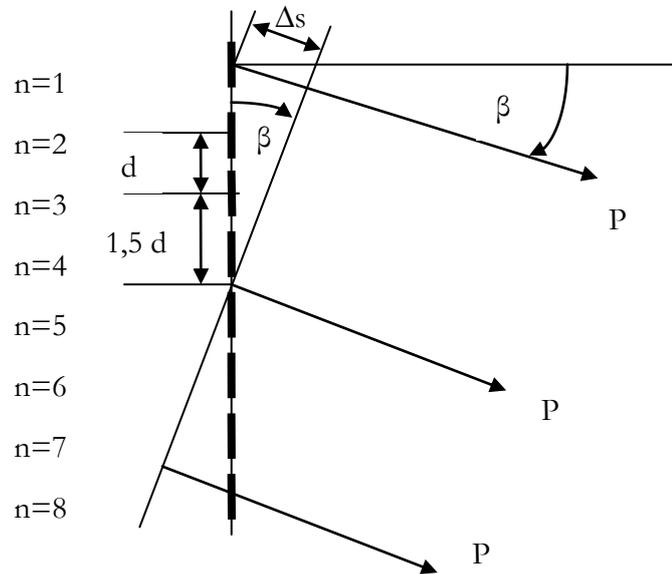


Abbildung 23: Skizze der Dipolanordnung

Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Breitkopf, 1979, Seite 282, Heft 6

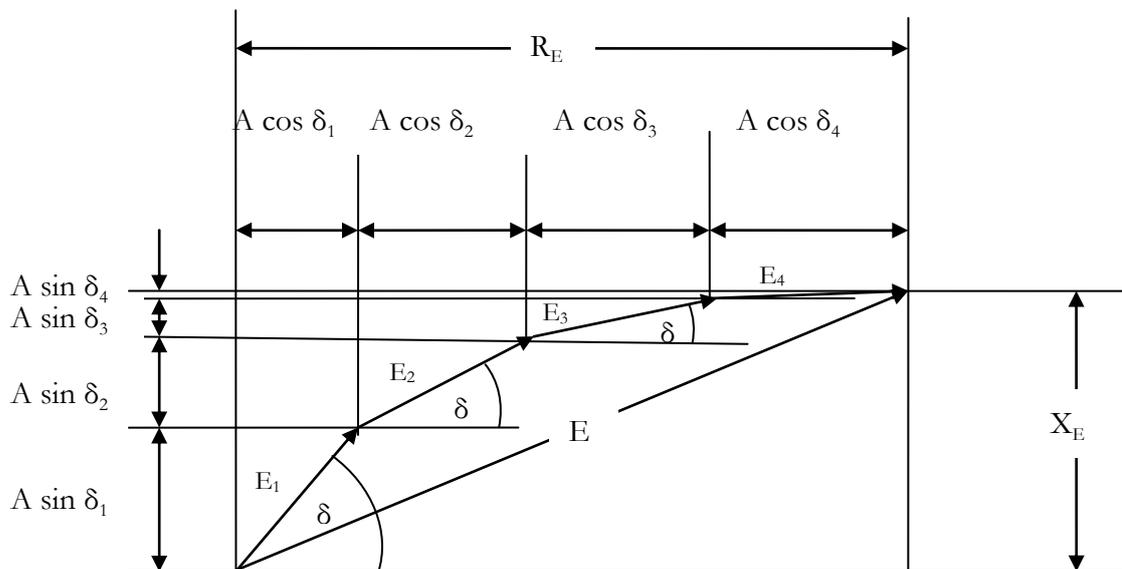


Abbildung 24: Skizze zur vektoriellen Addition

Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Breitkopf, 1979, Seite 283

Die Feldstärke  $E$  am Aufpunkt  $P$  ergibt sich durch Addition der Einzelfeldstärken unter Berücksichtigung des jeweiligen Phasenmaßes  $\delta$ . Dieses wird in Abbildung 24 vereinfacht an den oberen vier Dipolen dargestellt.

<sup>45</sup> Breitkopf, 1979, S. 282

In der Tabelle 1 werden die einzelnen Feldstärkeanteile für die acht Dipole berechnet.

Mit  $\frac{N+1}{2} - n$  wird der Abstand zum Mittelpunkt der Dipolgruppe als vielfaches des Abstandes  $d$  bestimmt. Mit dem Faktor  $d \cdot \sin \beta$  wird daraus der Gangunterschied. Daraus kann das Phasenmaß  $\alpha$  gemäß Gleichung 2.3-22 bestimmt werden. Mit den  $\sin$  und  $\cos$  Funktionen können anschließend die Real- und Imaginärteile der Feldvektoren berechnet werden. Die Real- und Imaginärteile werden einzeln addiert. Nach der Multiplikation mit der Amplitude wird daraus eine Feldstärke.

| n | $(N+1)/2 - n$ | $\Delta s = [(N+1)/2-n] d \sin \beta$ | Phasenmaß $\delta$ | $A \cos \delta_n$ | $A \sin \delta_n$ |
|---|---------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | +3,5          | +0,305045 m                           | -36,605°           | A 0,8028          | -A 0,60           |
| 2 | +2,5          | +0,217889 m                           | -26,146°           | A 0,8977          | -A 0,44           |
| 3 | +1,5          | +0,130734 m                           | -15,688°           | A 0,9627          | -A 0,27           |
| 4 | +0,5          | +0,043578 m                           | -5,229°            | A 0,9958          | -A 0,09           |
| 5 | -0,5          | -0,043578 m                           | +5,229°            | A 0,9958          | +A 0,09           |
| 6 | -1,5          | -0,130734 m                           | +15,688°           | A 0,9627          | +A 0,27           |
| 7 | -2,5          | -0,217889 m                           | +26,146°           | A 0,8977          | +A 0,44           |
| 8 | -3,5          | -0,305045 m                           | +36,605°           | A 0,8028          | +A 0,60           |
|   |               |                                       |                    | $R_E = A 7,318$   | $X_E = A 0$       |

**Tabelle 1: Berechnung der Einzelanteile der Dipole**

Die gesamte Feldstärke berechnet sich aus

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{\mathbf{R}_E^2 + \mathbf{X}_E^2} \quad \text{Gleichung 2.3-23}$$

Für das oben berechnete Beispiel ist der Imaginärteil = 0. Daraus folgt  $|\mathbf{E}| = \mathbf{R}_E$

$$|\mathbf{E}| = \mathbf{A} \cdot \mathbf{7,318}$$

Die Gesamtfeldstärke der 8 Dipole ist am Aufpunkt P mit dem Winkel  $\vartheta = (90^\circ + \beta)$  nicht das achtfache der Einzelfeldstärken sondern nur das 7,318 fache. Der Gruppenfaktor ist

$$\mathbf{F}_{Gr} = \mathbf{7,318}$$

Mit  $\beta = 0^\circ$  gäbe es keine Phasendifferenzen. Die Feldstärke am Punkt P wäre das 8fache der Einzelfeldstärken. Der Gruppenfaktor  $F_{Gruppe}$  wäre 8.

### Vergleich der Gruppenfaktoren aus den beiden Berechnungswegen

Weg 1: Das Ergebnis aus der Berechnung mit der Gleichung ergibt

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = 7,318$$

Weg 2: Das Ergebnis aus der Addition der Vektoren beträgt

$$\mathbf{F}_{\text{Gr}} = 7,318$$

#### Fazit:

1. Die Rechenwege sind äquivalent
2. Da, wo die analytische Rechnung nach Weg 1 nicht möglich ist, weil zum Beispiel die Einzelcharakteristik nicht einfach beschrieben werden kann, ist eine Lösung nach Weg 2 der praktikablere Weg. Deswegen wird im Matlab-Programm aus Kapitel 4 Weg 2 gewählt.

## 3 Analyse des QuickBASIC Programms

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Grundlagen des existierenden QuickBASIC Programms gegeben. Anschließend werden die einzelnen Teile des Programms erklärt. Eine zeilenweise Analyse des QuickBASIC-Programms befindet sich im Anhang B.

### Allgemeines

Am Antennenmast sind mehrere Antennenelemente mit unterschiedlichen Positionen zusammengeschaltet, um die gewünschte Gesamt-Antennencharakteristik zu erzeugen. Dabei sind die einzelnen Elemente (Antennenelemente) in Zeilen und Spalten angeordnet. Wenn sich in der Waagerechten vier Antennen befinden, so spricht man von vier Spalten, wenn übereinander acht Antennenelemente senkrecht übereinander angeordnet sind, besitzt die Antenne acht Ebenen.

### 3.1 Grundidee

Die wesentlichen Elemente des Programms sind zwei Schleifenpaare:

- Im inneren Schleifenpaar werden die Ebenen und Spalten der Antennenelemente durchlaufen. Dabei werden die Amplituden und Phasen der einzelnen Elemente am Aufpunkt P berechnet und die Ergebnisse aller Elemente vektoriell addiert.
- Im äußeren Schleifenpaar werden der Azimut- bzw. der Erhebungswinkel durchlaufen. Danach wird die innere Schleife erreicht. Bei jedem Schleifendurchlauf wird die Amplitude und Phase jeden Antennenelements für die jeweiligen Winkel berechnet und die Ergebnisse aller Elemente vektoriell addiert. Ergebnis ist die resultierende Amplitude und Phase in Punkt P für jeden Winkel. Der Wert der Amplitude wird anschließend für jeden berechneten Winkel im Antennendiagramm dargestellt.

### Überblick über das QuickBASIC Programm

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| Angabe der Anzahl der Spalten, der zu berechnenden Antenne, der Rechenfrequenz und der Polarisation<br>Gegebenenfalls Angabe der Anfangs und Endwinkel für die Berechnung |  |  |  |
| Einlesen der Antennendaten (siehe Kapitel 3.2)  |  |  |  |
| Für alle Erhebungswinkel  |  |  |  |
| Für alle Azimutwinkel   |  |  |  |
| Für alle Spalten  |  |  |  |
| Für alle Zeilen   |  |  |  |
| Berechnen des Abstandes und des Winkels zwischen Antennenmast und Antenne (siehe Kapitel 3.3)   |  |  |  |
| Berechnen der Differenz zwischen Azimutwinkel und der Strahlrichtung der Antenne ( $\alpha$ )   |  |  |  |
| Berechnen der Differenz zwischen Erhebungswinkel und dem Neigungswinkel ( $\beta$ ), siehe Kapitel 3.3  |  |  |  |
| Berechnen der vertikalen und horizontalen Amplitudenfaktoren (siehe 3.4 und 3.5)  |  |  |  |
| Berechnen der Amplitude und der Phase jedes Elementes   |  |  |  |
| Umrechnen von Amplitude und Phase in Real- und Imaginärteil und aufaddieren der Komponenten über alle Zeilen und Spalten  |  |  |  |
| Für jeden Winkel wird der Real- und Imaginärteil in Betrag und Phase umgerechnet  |  |  |  |
| Ausgabe des Diagramms   |  |  |  |

**Tabelle 2: Übersicht über den Programmablauf des QuickBASIC -Programms**

Eine Beschreibung der einzelnen Schritte erfolgt in späteren Abschnitten.

## 3.2 Daten zur Berechnung der Diagramme

Es gibt zwei wichtige Matrizen (in QuickBASIC A und D, in Matlab `antenne_individ` und `antenne_allg` genannt) mit Daten der Antenne, die zur Berechnung des Diagramms erforderlich sind. A ist eine dreidimensionale Matrix, D eine zweidimensionale Matrix.

In A befinden sich Daten über die einzelnen Antennenebenen und -spalten, also Daten über die einzelnen Elemente.

1. Dimension: Ebene-Nummer,
2. Dimension: Spalten-Nummer
3. Dimension: Werte der Einzelemente

In der 3. Dimension befinden sich die Werte z.B. der Amplitude, der Speisephase, der Strahlrichtung und weiterer relevanter Parameter.

Die dritte Spalte in dem unten stehenden Beispiel für Matrix A enthält die Benennung für die Werte der 3. Dimension. In der realen Matrix existiert diese Spalte nicht. Sie wird hier nur zur Erklärung verwendet.

| Ebene-Nummer | Spalten-Nummer | Erklärung für die rechts stehenden Daten | Werte der Einzelemente |
|--------------|----------------|--|------------------------|
| Ebene 1      | Spalte 1       | Amplitude                                | 1                      |
|              |                | Speisephase                              | 0                      |
|              |                | Strahlrichtung                           | 270                    |
|              |                | Neigungswinkel                           | 0                      |
|              |                | Elemententfernung                        | 0.46                   |
|              |                | Elementrichtung                          | 270                    |
|              |                | Vertikaler Abstand                       | 0                      |
|              |                | Konstante Phase                          | 0                      |
| Ebene 1      | Spalte 2       | Amplitude                                | 1                      |
|              |                | Speisephase                              | 0                      |
|              |                | Strahlrichtung                           | 90                     |
|              |                | Neigungswinkel                           | 0                      |
|              |                | Elemententfernung                        | 0.46                   |
|              |                | Elementrichtung                          | 90                     |
|              |                | Vertikaler Abstand                       | 0                      |
|              |                | Konstante Phase                          | 0                      |

**Tabelle 3: Beispiel für den Aufbau der Matrix A, hier für zwei Spalten und eine Ebene**

In der ersten Spalte von D stehen allgemeine Informationen über die Antenne. Angegeben wird z.B. in der ersten Spalte der Matrix der Dipol-Abstand in Metern, die Dipolebenen pro Element und die Nennfrequenz in MHz. In der zweiten und dritten Spalte von D stehen die horizontalen und vertikalen Fourier-Koeffizienten. Auf die Fourier-Koeffizienten wird in Kapitel 3.4.3 genauer eingegangen.

|                         | Spalte 1 | Spalte 2                         | Spalte 3                       |
|-------------------------|----------|----------------------------------|--------------------------------|
| Erklärung für Spalte 1  | Daten    | Fourier-Koeffizienten horizontal | Fourier-Koeffizienten vertikal |
| Nicht verwendet         | 0        | .25048                           | .02941                         |
| Vertikaler Nullwinkel   | 0.000    | .41316                           | .19686                         |
| Korrektur Horizontal    | 0.180    | .26622                           | .22517                         |
| Gewinn je Element in dB | 10.900   | .03146                           | .22249                         |
| Korrektur Rückwärts     | 1.000    | .03305                           | .15607                         |
| Dipolebenen pro Element | 4.000    | -.00025                          | .10564                         |
| Nennfrequenz in MHz     | 434.000  | .0061                            | .04786                         |
| Dipol-Abstand in Metern | 0.260    | -.00429                          | .01789                         |
| Element-Art             | 5.000    | .00129                           | .0029                          |
| Bezugspunkt in Metern   | 0.098    | .00278                           | -.00429                        |

**Tabelle 4: Beispiel für den Aufbau der Matrix D**

Eine Beschreibung der einzelnen Daten und ihrer Verwendung erfolgt in einem späteren Abschnitt.

Die Informationen beider Matrizen beschreiben vollständig die Konfiguration einer Antenne, um das Strahlungsdiagramm berechnen zu können. Die Fourier-Koeffizienten sind ebenfalls mit Hilfe des QuickBASIC Programms berechenbar. Diese sollen zukünftig durch gemessene Elementdaten ersetzt werden. Die Berechnung der Fourier-Koeffizienten wird daher nicht erklärt, ihre Verwendung wird in Abschnitt 3.4 beschrieben.

### 3.3 Bestimmung der Phase der Einzelstrahler am Aufpunkt P

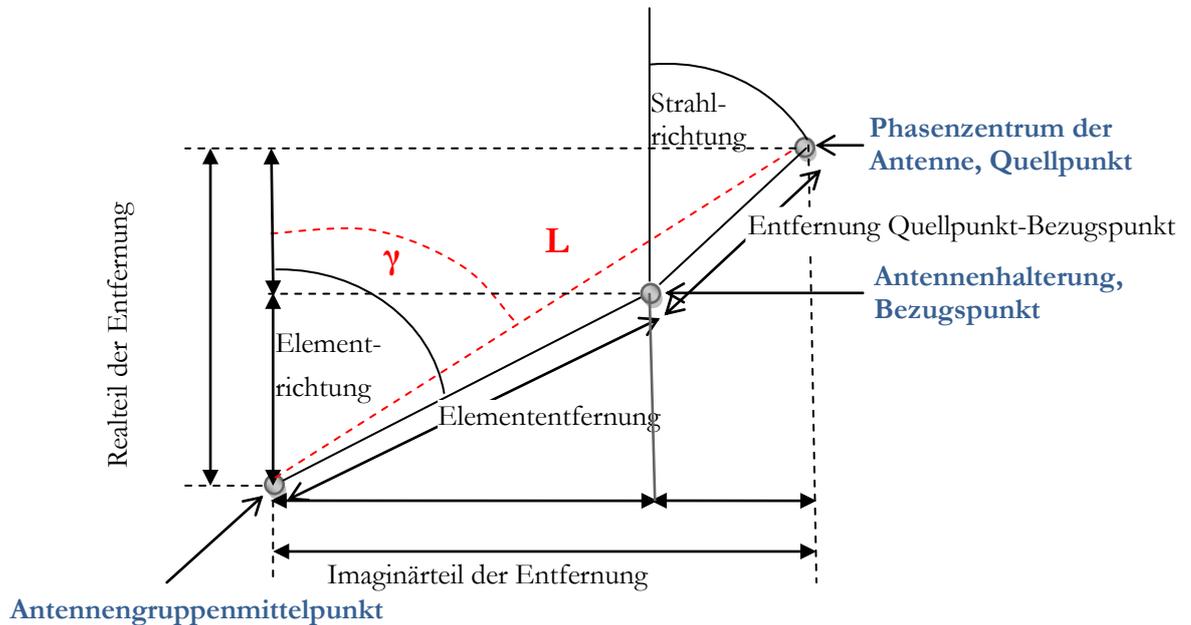
Für die Berechnung von Gruppenantennen muss die Phase und die Amplitude der Einzelstrahler berechnet werden. In diesem Kapitel wird die Bestimmung der Phase behandelt.

#### 3.3.1 Bestimmung der Phase aus dem Weg vom Einzelstrahler zum Aufpunkt P

Die Phasenverschiebung aus dem Weg vom Einzelstrahler zum Aufpunkt P ist die erste Komponente der Gesamtphase. Durch die räumliche Anordnung der Antennenelemente entstehen, wie in Abschnitt 2.5.1 erklärt, Phasenunterschiede in Aufpunkt P, verursacht durch die unterschiedliche Wegstrecken.

Stellt man sich den Aufpunkt P in großer Entfernung vor, sind die Ausbreitungswege aller Elemente zum Aufpunkt P annähernd parallel und haben daher die gleiche Länge. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch der Unterschied der Entfernung auf Grund der Montageposition der Elemente, der eine Phasendifferenz am Aufpunkt P verursacht.

Dazu wird in einem ersten Schritt die Strecke  $L$  zwischen Antennengruppenmittelpunkt und dem Phasenzentrum des einzelnen Elementes bestimmt. Außerdem wird der Winkel  $\gamma$  von  $L$  in Bezug zur Nordrichtung berechnet. Die Strecke  $L$  und der Winkel  $\gamma$  werden in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: Berechnung des Abstandes zwischen Antennengruppenmittelpunkt und Phasenzentrum der Antenne. Betrachtung von Oben.**

Der Antennengruppenmittelpunkt befindet sich im Mittelpunkt des Antennenmastes und wird als Bezugspunkt zur Berechnung der Gruppe verwendet.  $L$  setzt sich zusammen aus der Elemententfernung und der Länge Quellpunkt-Bezugspunkt.

In Abbildung 26 wird der Antennenmast von oben gezeigt. Hier wird erklärt, wie in dem QuickBASIC-Programm die horizontalen Wegunterschiede berechnet werden, die zu einem Phasenunterschied führen. Auf Basis von  $L$  und des Winkel  $\gamma$  aus Abbildung 25 wird diese Phasendifferenz bestimmt, die sich für jedes Element aus der Entfernung  $L$  ergibt. Als Bezugspunkt für die Phase wird der Antennenmittelpunkt genommen. Berechnet wird die Strecke  $S$ , hier  $S_1$  und  $S_2$ , siehe Abbildung 26.

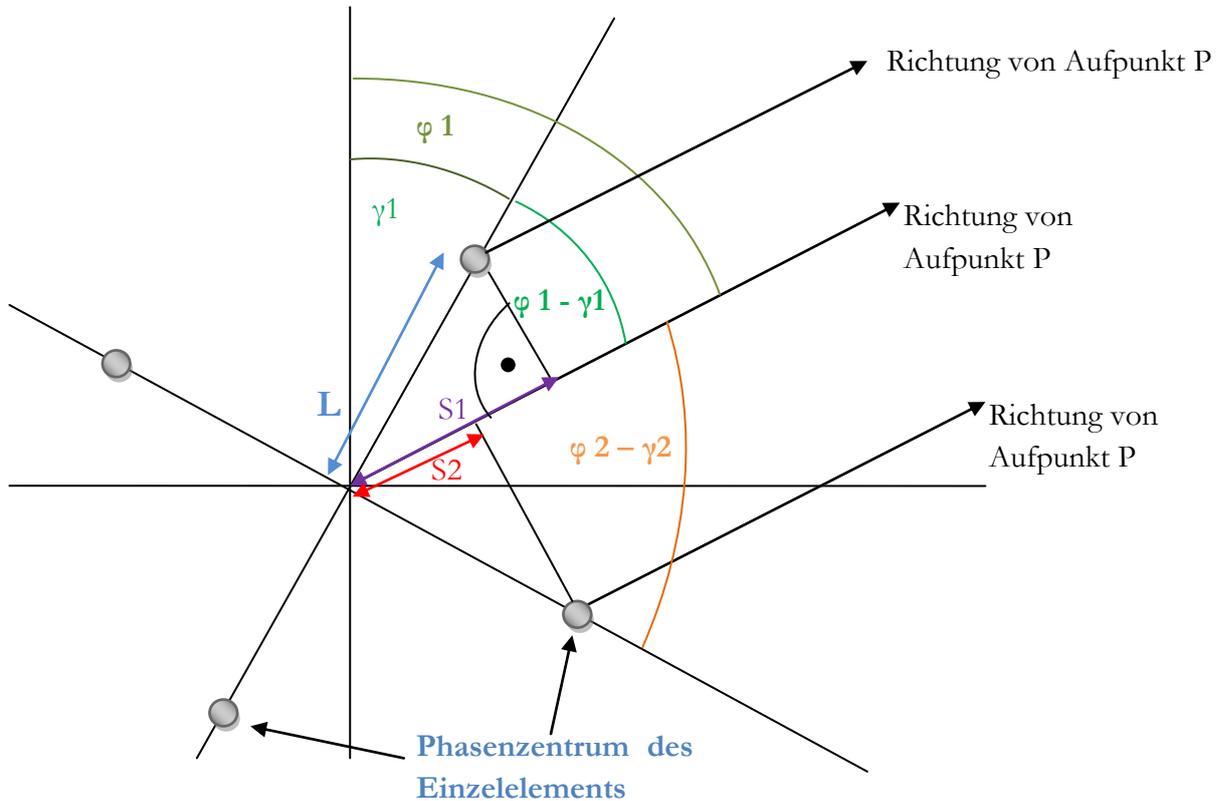


Abbildung 26: Berechnung der Phasendifferenz aus der geometrischen Anordnung

In der Abbildung 26 sind zwei Strecken  $S_1$  und  $S_2$  dargestellt, an denen die Differenzlänge der betroffenen Antennenelemente zum Aufpunkt  $P$  verdeutlicht wird.

$L$  ist der Abstand vom Antennenmastmittelpunkt zum Phasenzentrum des Einzelstrahlers

$\varphi$  ist der Azimutwinkel zum Aufpunkt  $P$  zwischen  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ , hier  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$

$\gamma$  ist der Winkel zwischen Nordrichtung und dem Winkel der sich aus der vektoriellen Addition von Elementrichtung und Strahlrichtung ergibt, hier  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$

$S$  ist die gesuchte Strecke, hier  $S_1$  und  $S_2$

Aus  $S_1$  und  $S_2$  wird die Phasendifferenz bestimmt. Allerdings wird in dem QuickBASIC Programm die Differenz von  $S_1$  und  $S_2$  nicht direkt verwendet. Stattdessen wird aus jeder Strecke  $S$  die Phase der Einzelemente am Aufpunkt  $P$  bestimmt. Mit dieser Phase und dem Betrag der Amplitude wird, nach der Umrechnung in Real- und Imaginärteil, die vektorielle Addition aller Einzelstrahler durchgeführt.

$S$  wird berechnet über das rechtwinklige Dreieck mit Hypotenuse  $L$  und dem Winkel  $\varphi - \gamma$ .

$$S = L \cos (\varphi - \gamma)$$

Gleichung 3-1

Mit der Gleichung 3-2 lässt sich die Phase  $\delta$  am Aufpunkt P für jedes Antennenelement einzeln bestimmen.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} L \cos(\varphi - \gamma) \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Nach der Betrachtung der horizontalen Wegunterschiede werden auch die vertikalen berechnet. Eine äquivalente Rechnung wird für die Phase durchgeführt, die vom vertikalen Wegunterschied verursacht wird.

### 3.3.2 Berechnung der Gesamtphase eines Einzelstrahlers am Aufpunkt P

Um die resultierende Phase eines Einzelstrahlers am Aufpunkt P zu bestimmen, müssen sämtliche Phasen berücksichtigt werden.

Gesamtphase:

- Phase die aus den horizontalen Längendifferenzen der Montage verursacht werden
- + Phase die aus den vertikalen Längendifferenzen der Montage verursacht werden
- + ggf.  $+180^\circ$  falls die Differenz zwischen Erhebungswinkel und dem Neigungswinkel größer als  $90^\circ$  ist
- + Phase des Speisestroms skaliert mit dem Quotienten (Rechenfrequenz / Nennfrequenz)

### 3.3.3 $\alpha$ und $\beta$ und ihre Maxima

Der Winkel  $\alpha$  (im QuickBASIC-Programm B genannt) ist die Differenz zwischen Azimutwinkel und der Strahlrichtung der Antenne (vergl. Abbildung 27). Der Winkel  $\beta$  (im QuickBASIC-Programm C genannt) ist die Differenz zwischen Erhebungswinkel und dem Neigungswinkel mal dem Vorzeichen von  $\cos(\beta)$ .

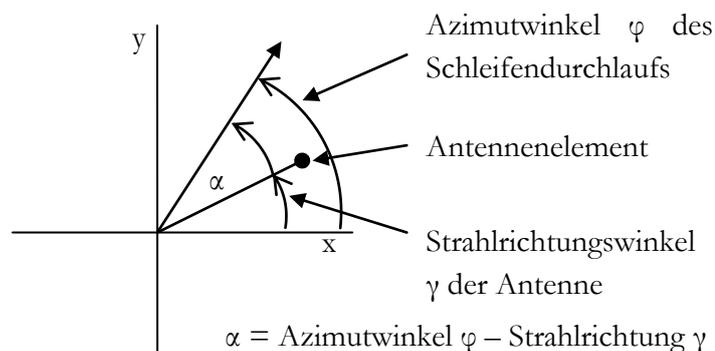


Abbildung 27: Berechnung des Winkels  $\alpha$

Die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  können bestimmte Maximalwerte annehmen und können folgendermaßen berechnet werden:

- $\alpha$  kann rechnerisch zwischen  $-360^\circ$  und  $+360^\circ$  variieren, da der Azimutwinkel in der Schleife und die Strahlrichtung der Antenne Werte zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  annehmen können.

Die Gleichung für  $\alpha$  lautet:

$$\alpha = \text{Azimutwinkel } \varphi - \text{Strahlrichtung } \gamma \text{ der Antenne}$$

$$\alpha = [0^\circ \text{ bis } 360^\circ] - [0^\circ \text{ bis } 360^\circ]$$

Das ergibt ein Maximum von  $\alpha = [360^\circ] - [0^\circ] = 360^\circ$

und ein Minimum von  $\alpha = [0^\circ] - [360^\circ] = -360^\circ$

- $\beta$  kann zwischen  $-90^\circ$  bis  $+270^\circ$  variieren, da der Erhebungswinkel in der Schleife Werte zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  und der Neigungswinkel der Antenne Werte zwischen  $\pm 90^\circ$  annehmen kann.

Die Gleichung für  $\beta$  lautet:

**$\beta = \text{Erhebungswinkel} - \text{Neigungswinkel} \cdot \text{Vorzeichen von } \cos(\vartheta)$**

$\beta = [0^\circ \text{ bis } 180^\circ] - [\pm 90^\circ]$

Das ergibt ein Maximum von  $\beta = [180^\circ] - [-90^\circ] = 270^\circ$

und ein Minimum von  $\beta = [0^\circ] - [90^\circ] = -90^\circ$

### 3.4 Bestimmung der Amplitude des Einzelstrahlers am Aufpunkt P

Für die Berechnung von Gruppenantennen muss die Phase und die Amplitude der Einzelstrahler bekannt sein. In diesem Kapitel wird die Bestimmung der Amplitude behandelt. Zuerst wird beschrieben, wie sich die Gesamtamplitude zusammensetzt und anschließend werden in den Unterkapiteln die Komponenten der Gesamtamplitude genauer untersucht.

Hier werden zwei Wege zur Berechnung der Amplitude betrachtet:

1. Sind die Amplituden und Phasen aus den Herstellerdaten in  $1^\circ$  Schritten bekannt, lassen sich die Amplituden der Antennenelemente unter Berücksichtigung der Phasen am Aufpunkt P zur Gesamtamplitude addieren. Der Rechenweg hierzu ist in Abschnitt 2.5.2 erklärt. Dieser Weg wird nicht im QuickBASIC-Programm verwendet, da keine Primärdaten in  $1^\circ$  Schritten während der Entstehungszeit vorlagen.

Deswegen wurde ein alternativer Weg gewählt:

2. Die Amplitude kann am Aufpunkt P mit drei Faktoren berechnet werden:

*Gesamtamplitude = Faktor vertikal · Faktor horizontal · Amplitude des Antennenelementes*

Die vertikalen und horizontalen Faktoren sorgen für eine Anpassung der Amplitude an die Form der Antennendiagramme. Die Werte der Faktoren werden aus Gleichungen berechnet (siehe Abschnitt 3.4.4). In vielen Fällen werden dafür die schon erwähnten Fourier-Koeffizienten verwendet, da mit ihnen die Berechnung einfach ist. Der vertikale Faktor gibt die Form des Vertikaldiagramms vor, d.h. dieser Faktor ändert sich für jeden Erhebungswinkel. Der horizontale Faktor bestimmt die Form des Horizontaldiagramms, d.h. dieser Faktor ändert sich für jeden Azimutwinkel.

Bei der Amplitude des Antennenelementes handelt es sich um die Amplitude, die von der Speisung des Elementes verursacht wird. Sie ist auf 1 normiert. Die Amplitude wird für jedes Antennenelement in Matrix A angegeben. Durch Werte, die von eins abweichen, kann z.B. ein Gesamtdiagramm erzeugt werden, das in der horizontalen Ebene in einer Richtung stärker abstrahlt. In der Vertikalen können Nullstellen an Empfangsorten aufgefüllt werden.

Je nach Elementart werden die vertikalen und horizontalen Faktoren mit passenden Gleichungen bestimmt. Diese Gleichungen werden im Folgenden näher erläutert.

### 3.4.1 Berechnungswege für die unterschiedlichen Bauformen der Antennenelemente

Das QuickBASIC-Programm kann das Antennendiagramm je nach Elementtyp auf zwei unterschiedliche Weisen bestimmen:

- Handelt es sich z.B. um einen Dipol oder eine Yagi-Antenne, werden die Amplitudenfaktoren mit Hilfe von selbsterstellten Gleichungen berechnet. Die Entwickler des Programms haben sich dabei nicht auf Gleichungen aus der Literatur bezogen sondern Funktionen erarbeitet, die die Antennendiagramme dieser Elemente beschreiben. In der Entstehungszeit wurde dieser Weg in dem Programm verwendet. Im Folgenden werden diese Gleichungen als Näherungsgleichungen bezeichnet.
- Später waren für die Elemente Messwerte der Amplituden von den Herstellern in z.B. 10° Schritten als Berechnungsgrundlage verfügbar. Diese Messwerte wurden jedoch nicht direkt zur Berechnung verwendet. Zunächst wurden aus den gemessenen Werten der Amplitude Fourier-Koeffizienten berechnet, die den Amplitudenverlauf beschreiben. Damit lässt sich ein „glatter“ Amplitudenverlauf berechnen, der durch die Stützstellen der Messwerte läuft.

Die Werte des Phasenverlaufs über Azimut- und Erhebungswinkel wurden im QuickBASIC-Programm immer berechnet, auch wenn diese als Messwerte vorlagen.

Bevor mit der Betrachtung der Einzelemente begonnen wird, ist der Horizontalkorrekturfaktor zu erläutern.

### 3.4.2 Der Horizontalkorrekturfaktor

Sollen die Näherungsgleichungen aus der Anfangszeit des Programms verwendet werden, kommt ein weiterer Faktor zu den Berechnungen hinzu. Bei einigen Elementarten, die auf Dipolen basieren, wird ein Horizontalkorrekturfaktor verwendet. Dieser Faktor steht in der Matrix D (an der Stelle D(2)) und ist eine Hilfsvariable, um die Keule des Elementdiagramms auf die korrekte Breite zu bringen. Die Entwickler des Programms haben diese Faktoren durch Vergleiche mit bekannten Diagrammen ermittelt. Daher handelt es sich bei allen mit dem Horizontalkorrekturfaktor ermittelten Antennendiagrammen um Näherungen, die das Herstellerdiagramm des Elements möglichst gut wiedergeben.

Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung des Diagramms für einen Dipol:

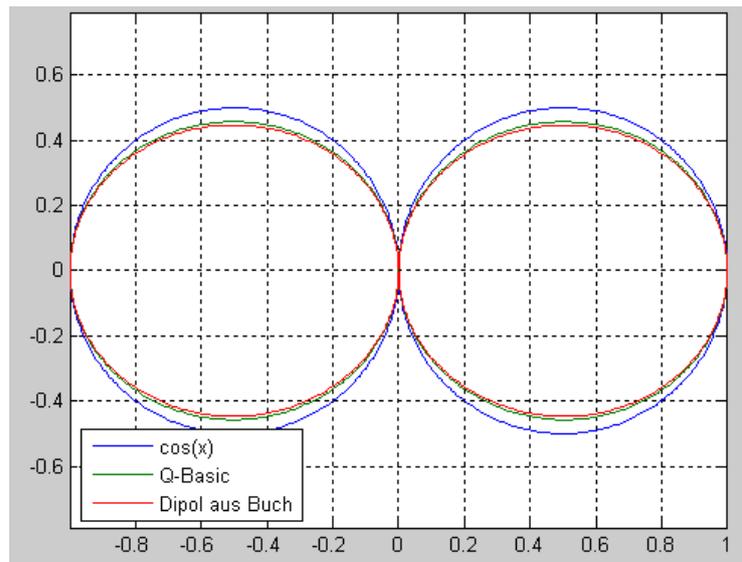


Abbildung 28: Vergleich verschiedener Dipolgleichungen auf 1 normiert

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

1. Cosinus- bzw. Sinusfunktion für den Hertzschen Dipol bzw. vereinfachte Dipolgleichung (Blaue Linie)

$$\mathbf{C}(\varphi) = \mathbf{cos}(\varphi) \quad \text{Gleichung 3-3}$$

2. Gleichung aus dem QuickBASIC Programm für einen realen Dipol (Grüne Linie)

$$\mathbf{C}(\varphi) = \frac{\mathbf{cos}(\varphi) + \mathbf{Horiz\_korr\_faktor} \cdot \mathbf{cos}(3\varphi)}{1 + \mathbf{Horiz\_korr\_faktor}} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

3. Gleichungen aus der Literatur für einen realen Dipol (Rote Linie)

$$\mathbf{C}(\varphi) = \frac{\mathbf{cos}\left(\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \mathbf{cos} \varphi\right) - \mathbf{cos}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\mathbf{sin} \varphi} \quad \text{Gleichung 3-5}^{46}$$

Wird der Horizontalkorrekturfaktor aus Gleichung 3-4 mit ca. 0.06 gewählt, stimmen die Ergebnisse von Gleichung 3-4 und 3-5 so gut überein, dass sie optisch nicht zu unterscheiden sind. Dieses ist in Abbildung 28 zu erkennen, obwohl dort der Horizontalkorrekturfaktor absichtlich noch nicht optimal gewählt wurde. Mit den Funktionen aus Gleichung 3-4 und 3-5 wurden die beiden inneren Linien in Abbildung 28 gezeichnet. Wird der Horizontalkorrekturfaktor zu ca. 0.06 gewählt, überlappen sich die beiden Linien.

In der Vergangenheit wurde der Horizontalkorrekturfaktor mit Hilfe von Tabellen ermittelt. Für eine Schrittweite von 0.01 des Horizontalkorrekturfaktors gibt es Tabellenspalten, in denen für einen Azimutwinkel von 0° bis 85° in 5° Schritten die zugehörigen Amplituden aufgeführt sind. Wird der Horizontalkorrekturfaktor für eine neue Antenne gesucht und die Amplituden von 0° bis 90° liegen als Herstellerdaten vor, z.B. aus dem Herstellerkatalog, muss die Spalte mit der besten Übereinstimmung der Amplituden gesucht werden. Der zugehörige Horizontalkorrekturfaktor zu dieser Spalte ist der gesuchte Wert. Die Tabellen wurden mit Gleichung 3.4 berechnet. Eine Beispielseite dieser Tabelle befindet sich im Anhang E.

<sup>46</sup> Quelle: Kraft, S. 4

### 3.4.3 Verwendung der Fourier-Koeffizienten in Matlab

Die Fourier-Koeffizienten des QuickBASIC Programms sind eine Lösung um eine Auflösung in  $1^\circ$  Schritten des Antennendiagramms zu erhalten, auch wenn die Primärdaten nur in  $10^\circ$  Schritten vorliegen. Es handelt sich dabei um eine spezielle Art einer Interpolation. Die Fourier-Koeffizienten werden aus den Primärdaten in  $10^\circ$  Schritten berechnet und ergeben somit eine Funktion, die das Antennendiagramm des Einzelstrahlers wiedergibt. Die Fourier-Reihe wurde nach dem zehnten Glied abgebrochen. Daher gibt es sowohl zehn vertikale als auch zehn horizontale Fourier-Koeffizienten.

### 3.4.4 Unterscheidung der 5 verschiedenen Elementarten

Das QuickBASIC Programm ist über die Jahre immer wieder erweitert worden. Anfangs wurden die Diagramme der einzelnen Elemente mit Hilfe von Gleichungen beschrieben, später mit Fourier-Koeffizienten. Je nach Elementart werden unterschiedliche Rechenwege zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Faktoren angewendet. Die fünf verschiedenen Elementarten sind:

1. Antennenfeld
2. Dipol
3. Superturndipole (Fourier-Koeffizienten)
4. Yagiantenne
5. Beliebige Antennen unter Verwendung der Herstellerdaten und Berechnung von Fourier-Koeffizienten.

Elementart 5 wird am häufigsten verwendet, da meistens gemessene Herstellerdaten für die Elemente vorliegen und die ungenaue Berechnung der Elementdiagramme mittels der Näherungsgleichungen nicht mehr erforderlich ist.

Um eine übersichtliche Darstellung über die Rechenwege zu geben, werden die fünf Wege getrennt dargestellt. Zum besseren Überblick wird ein Flussdiagramm als Vergleich benutzt. In dem Flussdiagramm sind nur die Berechnungsschritte vom Dipol, der Yagi-Antenne und dem Antennenfeld dargestellt.

Im QuickBASIC-Programm werden einige Programmabschnitte zur Bestimmung von mehreren Elementarten verwendet. Diese sind im Flussdiagramm mit Nummern versehen (Abschnitt 1 bis 4). Diese werden zu Beginn erklärt. Später, bei der Erklärung der einzelnen Rechenwege der Elementarten wird auf die vier Abschnitte verwiesen.

Vor Beginn der Berechnung wird der horizontale und vertikale Amplitudenfaktor auf eins gesetzt.

Die Berechnung der horizontalen und vertikalen Faktoren der Superturndipole (3) und den beliebigen Antennen mit den Fourier-Koeffizienten (5) ist sehr kurz und benötigt keine Darstellung in einem Flussdiagramm.

Flussdiagramm für die Elementarten Feld, Yagi und Dipol

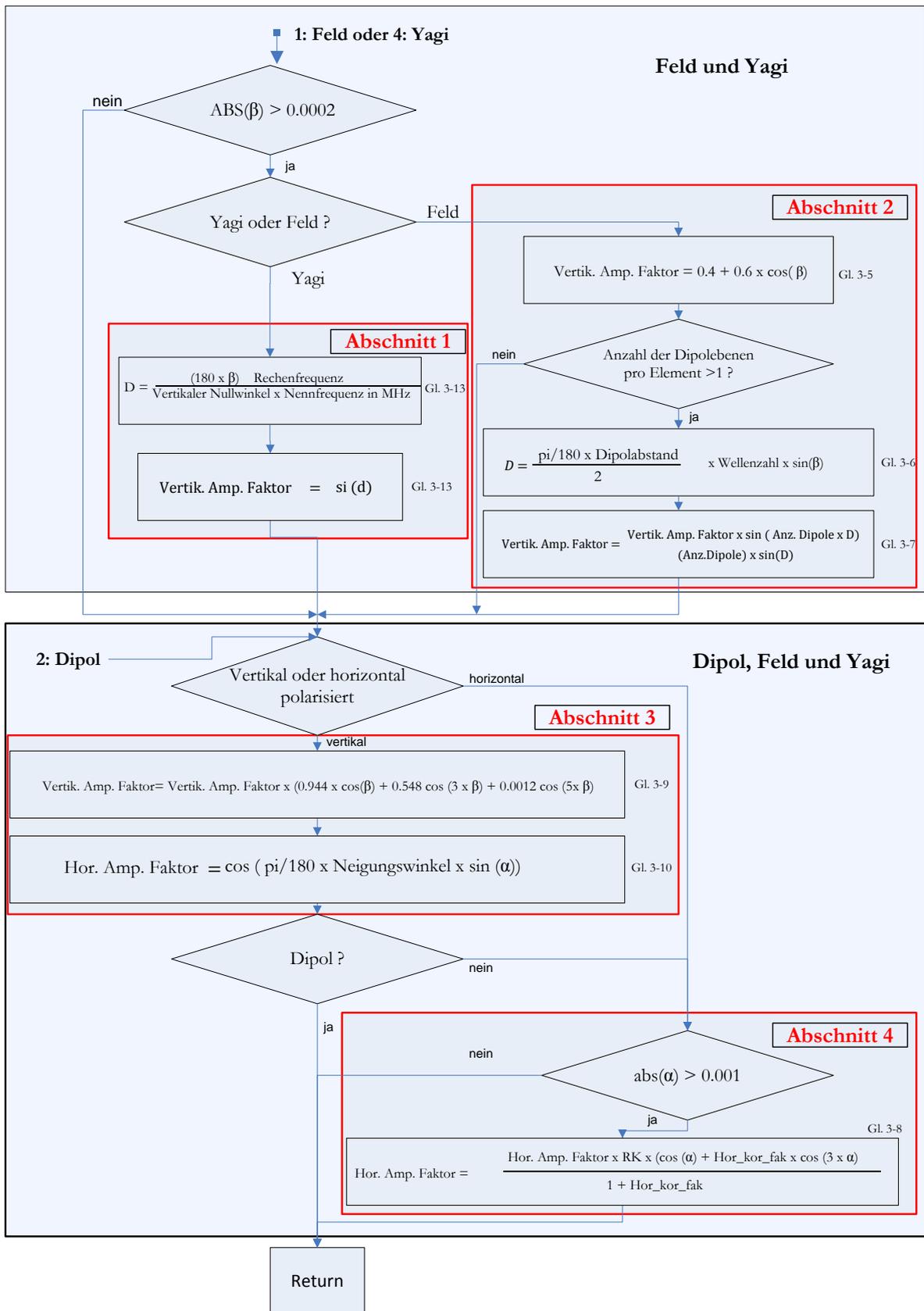


Abbildung 29: Flussdiagramm für Elementart 1 (Feld), 2 (Dipol) und 4 (Yagi)

Zuerst werden die im Flussdiagramm rot markierten Abschnitte beschrieben. Anschließend werden die Rechenwege der fünf verschiedenen Elementarten erläutert. Dabei wird immer wieder auf die rot markierten Abschnitte des Flussdiagramms verwiesen. Die von dem QuickBASIC-Programm verwendete Reihenfolge der Elementarten wurde nicht beibehalten. Eng verwandte Rechenwege werden hintereinander beschrieben. Der Dipol wird als erstes betrachtet, da sich die Rechenwege von der Yagi-Antenne und dem Antennen-Feld auf den Rechenweg des Dipols beziehen.

### Beschreibung der vier Abschnitte des Flussdiagramms

#### Abschnitt 1

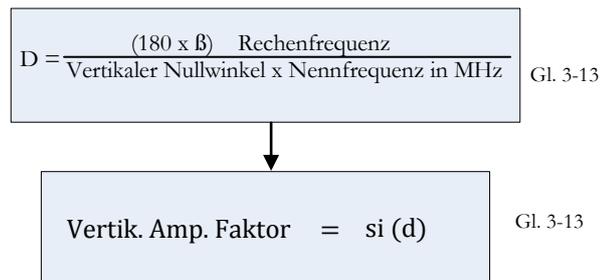


Abbildung 30: Abschnitt 1 aus dem Flussdiagramm

Für den Fall, dass die Differenz zwischen Erhebungs- und Neigungswinkel ungleich 0 ist ( $\beta \neq 0^\circ$ ), wird der vertikale Amplitudenfaktor (VK) bestimmt mit:

$$\text{Amp. fa. vertikal} = \text{si} \left( \frac{180 \cdot \beta}{\text{Vertikaler Nullwinkel}} \cdot \frac{\text{Rechenfrequenz}}{\text{Nennfrequenz}} \right) \quad \text{Gleichung 3-13}$$

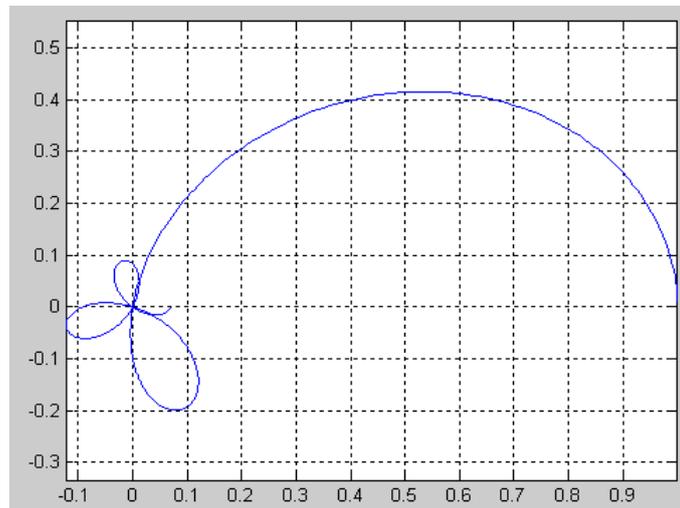


Abbildung 31: Vertikaldiagramm einer Yagi-Antenne (Gleichung 3-13)

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Es werden nur die ersten  $90^\circ$  des Vertikaldiagramms der Yagi-Antenne aus Abbildung 31 verwendet. Der Bereich von  $270^\circ$  bis  $360^\circ$  wird durch Spiegeln ermittelt.

## Abschnitt 2

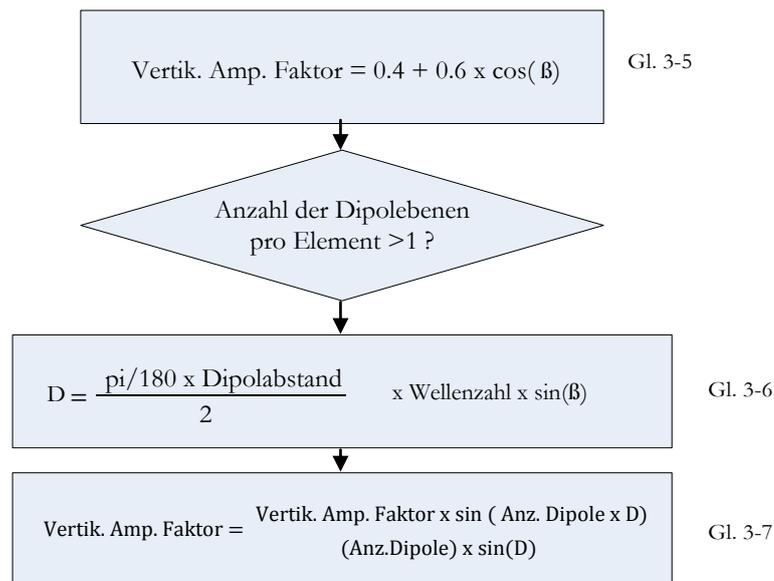


Abbildung 32: Abschnitt 2 aus dem Flussdiagramm

Gibt es nur eine Ebene, ist der vertikale Amplitudenfaktor

$$\text{Amp. fa. vert. Teil 1} = 0.4 + 0.6 \cos(\beta)$$

Gleichung 3-5

Der vertikale Amplitudenfaktor ist 1 wenn  $\beta = 0^\circ$  ist, das heißt, es wird das Diagramm in der x-y Ebene betrachtet. Ist  $\beta = 90^\circ$ , ist der vertikale Amplitudenfaktor = 0,4.

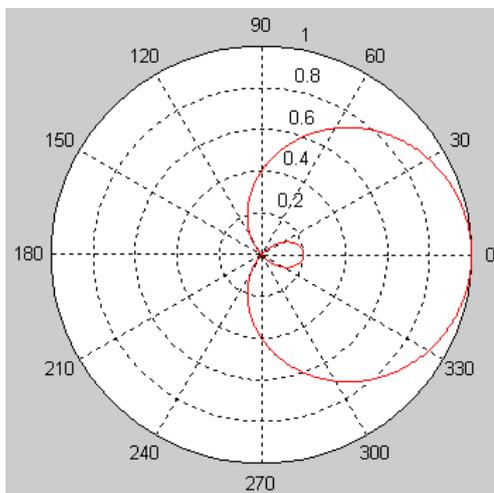


Abbildung 33: Gleichung 3-5, Erster Teil der Berechnung des vertikalen Amplitudenfaktors für ein Einer-Antennenfeld

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab Eigene

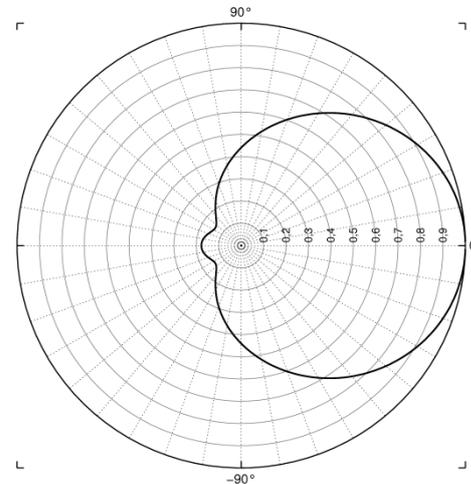


Abbildung 34: Vertikales Antennendiagramm eines Einer-Antennenfeldes berechnet aus Primärdaten des Antennenherstellers Kathrein

Quelle: Primärdaten von Kathrein

Die Gleichung ist mit Hilfe von Erfahrungswerten entstanden. Das Diagramm eines Einerfeldes wird mit Ausnahme der Rückwärtsstrahlrichtung gut dargestellt.

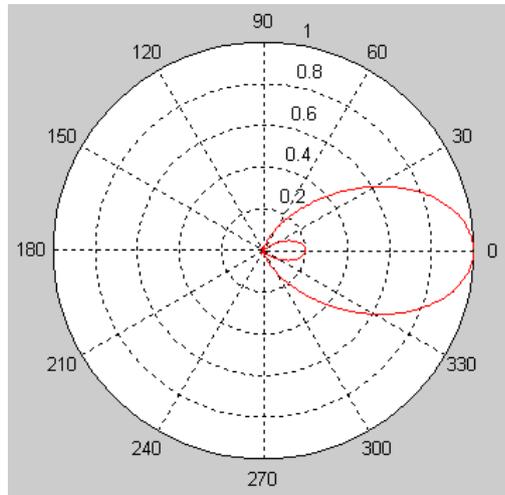
Bei mehr als einer Ebene von Dipolen innerhalb eines Feldes wird der Faktor D folgendermaßen bestimmt.

$$D = \frac{\pi}{180} \frac{\text{Dipolabstand}}{2} \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\beta)$$

Gleichung 3-6

Aus D wird anschließend der vertikale Amplitudenfaktor berechnet.

$$\text{Amp. fa. vert.} = \text{Amp. fa. vert. Teil 1} \cdot \frac{\sin(\text{Anzahl der Dipolebenen} \cdot D)}{\text{Anzahl der Dipolebenen} \cdot \sin(D)} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

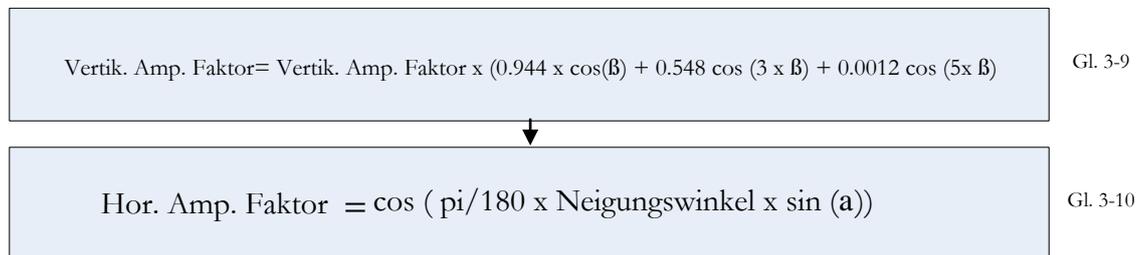


**Abbildung 35: Vertikales Diagramm eines Antennenfeldes mit zwei Dipolebenen pro Element (Gleichung 3-7).**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Je nach Anzahl der Dipolebenen ändert sich das Antennendiagramm. Je mehr Dipolebenen, desto stärker wird die Richtwirkung der Antenne. Beim Vergleich von Abbildung 33 und Abbildung 35 ist dies deutlich zu sehen.

### Abschnitt 3



**Abbildung 36: Abschnitt 3 aus dem Flussdiagramm**

Bei vertikaler Polarisation wird die Berechnung des vertikalen Amplitudenfaktors begonnen:

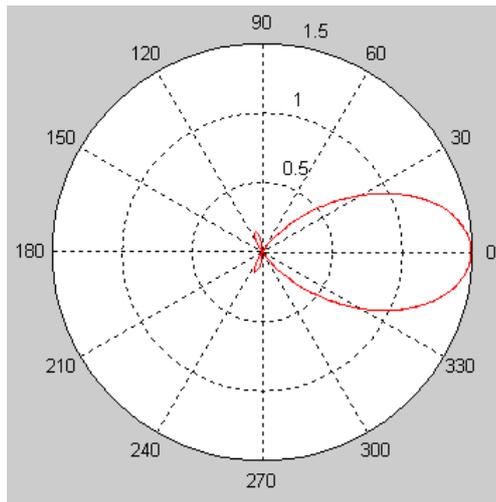
$$\text{Amp. fa. vertikal} = \text{Amp. fa. vertikal} \cdot (0.944 \cos(\beta) + 0.548 \cos(3 \beta) + 0.0012 \cos(5 \beta)) \quad \text{Gleichung 3-9}$$

Diese Funktion ist in Abbildung 37. dargestellt. Der Amplitudenfaktor vertikal ist am Anfang der Berechnung eins.

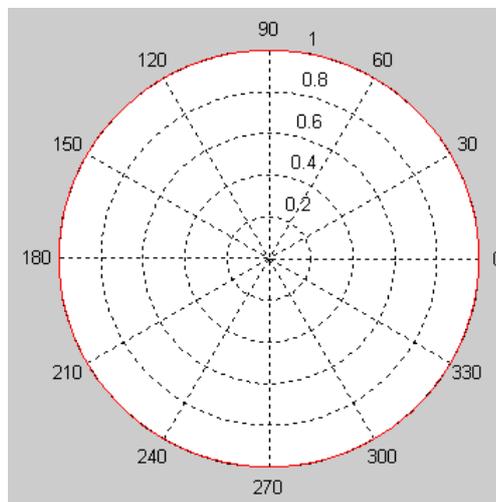
Der erste Teil des horizontalen Amplitudenfaktors wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$\text{Amp. fa. hor. Teil 1} = \cos\left(\frac{\pi}{180} \cdot \text{Neigungswinkel} \cdot \sin(\alpha)\right) \quad \text{Gleichung 3-10}$$

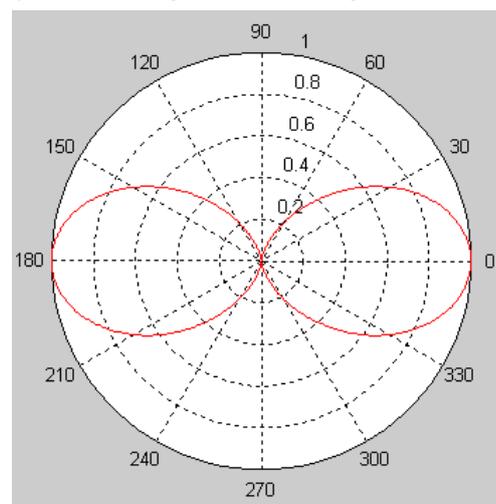
Diese Funktion ist in Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt.



**Abbildung 37: Gleichung 3-9, Vertikal polarisiertes, vertikales Antennendiagramm**  
 Berechnet wurde das Gesamtdiagramm ( $360^\circ$ ), verwendet wurden im  
 QuickBASIC-Programm die ersten  $90^\circ$  Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab



**Abbildung 38: Gleichung 3-10, Vertikal polarisiert, horizontales Antennendiagramm**  
 Antenne nicht geneigt, Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab



**Abbildung 39: Gleichung 3-10, „Vertikal“ polarisiert, die Antenne ist um  $90^\circ$  geneigt**  
 daher eigentlich horizontal polarisiert, horizontales Antennendiagramm  
 Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Beim vertikalen Diagramm (Gleichung 3-9, Abbildung 37) werden nur die ersten  $90^\circ$  verwendet. Der Winkelbereich größer  $90^\circ$  wird durch Symmetrie ermittelt. Das Endergebnis ist eine liegende Acht.

Wie zu erwarten, ergibt sich bei vertikaler Polarisation als Horizontaldiagramm ein Kreis (Abbildung 38). Wird der den Neigungswinkel auf  $90^\circ$  geändert, ergibt sich eine Acht. Auch dieses war zu erwarten, da die Polarisation dadurch horizontal wird (Abbildung 39).

#### Abschnitt 4

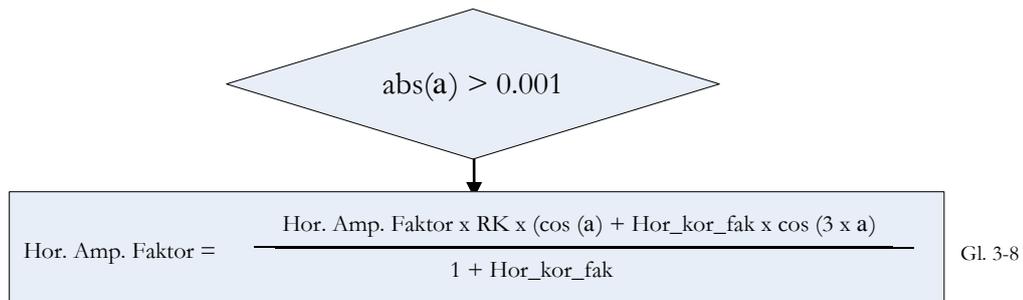


Abbildung 40: Abschnitt 4 aus dem Flussdiagramm

Bei horizontaler Polarisation und einem Winkel von mehr als  $5^\circ$  ( $0,001$  in Bogenmaß) aus der Hauptstrahlrichtung wird der horizontale Amplitudenfaktor auf Basis von Gleichung 3.4 bestimmt.

$$\text{Amp. fa. hor.} = \text{Bisheriger Amp. fa. hor.} \cdot \frac{\cos(\alpha) + \text{Horizontalkorrektur-Faktor} \cdot \cos(3 \alpha)}{1 + \text{Horizontalkorrektur-Faktor}} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Diese Gleichung stimmt bei geeigneter Wahl des Horizontalkorrekturfaktors gut mit den Ergebnissen der Gleichungen aus der Literatur für den realen Dipol überein.

Bei weniger als  $5^\circ$  wird als horizontaler Amplitudenfaktor eins gewählt und keine Berechnung durchgeführt. Es könnte auch die Gleichung verwendet werden, da sich ebenfalls näherungsweise als Ergebnis eins ergibt. Die Berechnung wird durch die Abfrage „weniger als  $5^\circ$ “ etwas schneller, da keine Rechnung durchgeführt werden muss. Bei der heutigen Rechengeschwindigkeit der Computer ist die Vereinfachung nicht erforderlich.

Nach der Beschreibung der vier Abschnitte aus dem Flussdiagramm folgt nun die Erklärung der Rechenwege der einzelnen Elementarten.

#### Elementart 2: Berechnung des Diagramms eines Dipols

Begonnen wird in der unteren Hälfte des Flussdiagramms (Abbildung 29). Die folgenden Rechenschritte sind für Dipole, Yagi-Antennen und Antennen-Felder annähernd gleich.

Im ersten Schritt des Programms wird zwischen horizontal oder vertikal polarisierten Antennen unterschieden.



**Horizontale Polarisation:**

Bei horizontaler Polarisation wird mit der Berechnung des horizontalen Amplitudenfaktors begonnen. Dieser Teil wird in **Abschnitt 4** des Flussdiagramms dargestellt.

Dies ist der letzte Rechenschritt für horizontal polarisierte Dipole.

**Vertikale Polarisation:**

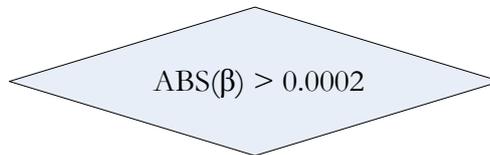
Bei vertikaler Polarisation wird mit der Berechnung des vertikalen Amplitudenfaktors begonnen. Dieser Teil wird in **Abschnitt 3** des Flussdiagramms dargestellt.

Dies ist der letzte Rechenschritt für vertikal polarisierte Dipole.

Es Endet die Berechnung des Dipols. Das Programm kehrt zur Aufrufstelle zurück.

**Elementart 1: Berechnung des Diagramms eines Antennenfeldes**

Die Berechnung beginnt im oberen Teil des Flussdiagramms.



Ist  $\beta = 0^\circ$  ( $ABS(\beta) > 0.0002$ , Flussdiagrammabfrage „nein“) wird der Rechenteil des Vertikaldiagramms übersprungen und mit der Abfrage der Polarisierung des Elements begonnen. Hierbei wird nur das Diagramm in der horizontalen Ebene berechnet. Die Rechenschritte werden je nach Polarisierung in **Abschnitt 3 bzw. 4** des Flussdiagramms beschrieben.

Für den Fall, dass die Differenz zwischen Erhebungswinkel und Neigungswinkel ungleich 0 ist ( $\beta \neq 0^\circ$ ), wird der vertikale Amplitudenfaktor (VK) in Abhängigkeit von der Anzahl der Dipolebenen pro Element bestimmt. Die Rechenschritte werden in **Abschnitt 2** des Flussdiagramms beschrieben.

Anschließend wird die Berechnung im unteren Teil des Flussdiagramms fortgesetzt. Die Rechenschritte werden je nach Polarisierung im **Abschnitt 3 und 4** oder ausschließlich **4** des Flussdiagramms erläutert. Bei vertikaler Polarisierung wird **Abschnitt 3 und 4** ausgeführt, bei horizontaler nur **Abschnitt 4**.

Damit endet die Berechnung der Elementart Antennen-Feld. Das Programm kehrt zur Aufrufstelle zurück.

**Elementart 4: Berechnung des Diagramms einer Yagi-Antenne**

Die Berechnung der Yagi-Antenne stimmt in großen Teilen mit der Berechnung von Antennenfeldern überein.

Die Berechnung beginnt im oberen Teil des Flussdiagramms (Abbildung 29).

Ist  $\beta = 0^\circ$  ( $ABS(\beta) > 0.0002$ , Flussdiagrammabfrage „nein“) wird der Rechenteil des Vertikaldiagramms übersprungen und mit der Abfrage der Polarisierung des Elements begonnen. Es wird nur das Diagramm in der horizontalen Ebene berechnet. Die Rechenschritte werden je nach Polarisierung in **Abschnitt 3 bzw. 4** des Flussdiagramms beschrieben.

Für den Fall, dass die Differenz zwischen Erhebungs- und Neigungswinkel ungleich Null ist ( $\beta \neq 0^\circ$ ) wird der vertikale Amplitudenfaktor (VK) bestimmt. Die Rechenschritte werden in **Abschnitt 1** des Flussdiagramms beschrieben.

Anschließend wird die Berechnung im unteren Teil des Flussdiagramms fortgesetzt. Die Rechenschritte werden je nach Polarisierung im **Abschnitt 3 und 4** oder ausschließlich **4** des Flussdiagramms erläutert. Bei vertikaler Polarisierung wird **Abschnitt 3 und 4** ausgeführt, bei horizontaler nur **Abschnitt 4**.

Damit endet die Berechnung der Elementart Yagi-Antenne. Das Programm kehrt zur Aufrufstelle zurück.

### Elementart 5: Allgemeine Berechnung des Diagramms unter Verwendung der Fourier-Koeffizienten

Diese Berechnung ist unabhängig von der Antennen-Bauart.

Bei Elementart 5 läuft die Berechnung von horizontalen und vertikalen Amplitudenfaktoren ähnlich der Berechnung der Superturnstile Antenne. Hier werden alle 10 Fourier-Koeffizienten verwendet.

Verwendung der Fourier-Koeffizienten:

Ist  $\alpha = 0^\circ$  ist der waagerechte Faktor = 1 (Maximum der Amplitude), ist  $\beta = 0^\circ$  ist der horizontale Faktor = 1 (Maximum der Amplitude). Ist der Winkel größer als Null wird der waagerechte und horizontale Faktor aus den Fourier-Koeffizienten berechnet.

Horizontaler Faktor :

$$\text{Amp. fa. hor.} = \sum_{a=0}^9 H(a) \cdot \cos(a \cdot \alpha) \quad \text{Gleichung 3-14}$$

$H(a)$  = horizontale Fourier – Koeffizienten

Vertikaler Faktor:

$$\text{Amp. fa. vert.} = \sum_{a=0}^9 V(a) \cdot \cos(a \cdot \beta) \quad \text{Gleichung 3-15}$$

$V(a)$  = vertikale Fourier – Koeffizienten

$H(a)$  und  $V(a)$  werden aus einer Datei eingelesen. Durch den Faktor  $a$  im Cosinus ergibt sich eine mit steigendem Fourier-Koeffizienten unterschiedliche Gewichtung.

Hier endet die Berechnung der Elementart 5. Das Programm kehrt zur Aufrufstelle zurück.

### Elementart 3: Berechnung des Diagramms einer Superturnstile-Antenne

Bei dem Superturnstile werden die Fourier-Koeffizienten zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Amplitudenfaktoren verwendet. Von den 10 Koeffizienten wird nur jeder zweite verwendet. Der übrige Teil der Berechnung stimmt mit Elementart 5 überein.

$$\text{Amp. fa. hor.} = \sum_{a=0}^4 H(2a) \cdot \cos(2a \alpha) \quad \text{Gleichung 3-11}$$

$H(a)$  = horizontale Fourierkoeffizienten

$$\text{Amp. fa. vert.} = \sum_{a=0}^4 V(2a) \cdot \cos(2a \beta) \quad \text{Gleichung 3-12}$$

$V(a)$  = vertikale Fourierkoeffizienten

Hier endet die Berechnung der Elementart 3. Das Programm kehrt zur Aufrufstelle zurück.

### Abschluss des Abschnitts 3.3 und 3.4

Nach der Bestimmung Phase sowie der horizontalen und vertikalen Faktoren, zur Bestimmung der Amplitude, kann mit diesen Werten die abschließende Berechnung des Antennendiagramms vorgenommen werden.

## 3.5 Addition der Real- und Imaginärteile aller Antennenelemente am Mast

Ist die Amplitude und die Phase bestimmt worden, kann mit diesen Werten der Real- und Imaginärteil bestimmt werden. Anschließend erfolgt eine Addition über alle Antennenelemente für jeweils einen Winkel.

$$\begin{aligned}
 \text{Summe Realteile} &= \sum_{N=1}^{\text{Anzahl Antennenelemente}} \text{Realteil}(N) \\
 \text{Summe Imaginärteile} &= \sum_{N=1}^{\text{Anzahl Antennenelemente}} \text{Imaginärteil}(N)
 \end{aligned}$$

Aus der Summe der Real- und Imaginärteile lässt sich Amplitude und Phase für jeweils einen Winkel  $\alpha$  oder  $\beta$  bestimmen.

## Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Wege zur Berechnung der Amplituden und Phase der Einzelemente beschrieben. Hier erfolgt eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Fakten:

- Hersteller liefern manchmal Primärdaten, d.h. Werte für Amplitude und Phase, in  $1^\circ$  Schritten. Diese Schrittweite würde ausreichen, um die vektorielle Addition direkt nach Ermittlung der Wegdifferenzen der Einzelstrahler durchzuführen (siehe Abschnitt 3.5). Das QuickBASIC-Programm kann Herstellerdaten in  $1^\circ$  Schritten nicht verarbeiten.
- Das QuickBASIC Programm verwendet Daten der Antennenhersteller nicht direkt zur Berechnung. Aus den Primärdaten werden in der Regel Fourier-Koeffizienten berechnet, mit denen eine Nachbildung des Antennendiagramms möglich ist. Die gemessene Phase wird gar nicht verwendet, sondern ausschließlich berechnet. Dieser Umweg war erforderlich, da zur Entstehungszeit die Primärdaten nur in  $10^\circ$  Schritten vorlagen.
- Am einfachsten und genauesten wäre die direkte Verwendung der Primärdaten.
- Am aufwendigsten und ungenauesten ist die Bestimmung der Antennendiagramme mit Näherungsgleichungen (siehe Abschnitt 3.4.2, 3.4.4).

## 4 Nachbildung und Erweiterung des Programms in Matlab

Dieses Kapitel beschreibt die Nachbildung und Weiterentwicklung des Antennenprogramms. Das in Abschnitt 4.1 beschriebene Matlab-Programm rechnet mit:

- den Näherungsgleichungen, die in Abschnitt 3.4.4 beschrieben wurden
- den Fourier-Koeffizienten

Abschnitt 4.2 beschreibt eine Erweiterung des Programms. Verwendet werden:

- die Näherungsgleichungen, die in Abschnitt 3.4.4 beschrieben wurden
- die Fourier-Koeffizienten
- Herstellerdaten in  $1^\circ$  oder  $10^\circ$  Schritten

Der Quellcode befindet sich im Anhang C.

### 4.1 Nachbildung des QuickBASIC Programms in Matlab

Da es sich um eine Nachbildung des QuickBASIC Programms handelt, sollte es die folgenden Anforderungen erfüllen:

Berechnung des Diagramms mit:

- Fourier-Koeffizienten (Abschnitt 3.4.4)
- den bisherigen Gleichungen des QuickBASIC Programms (Abschnitt 3.4.4)

Für die Nachbildung des QuickBASIC Programms in Matlab wurde nur ein Teil des QuickBASIC Programms verwendet. Die Nachbildung beschäftigt sich mit den elementaren Rechenschritten und der Darstellung des Antennendiagramms. Das QuickBASIC Programm beinhaltet eine einfache Bedieneroberfläche sowie die Berechnung vom Antennengewinn, der Feldstärke und ein paar weiteren Optionen, die nicht übernommen wurden.

Da die Entwicklung einer Bedienungsfläche in Matlab nicht zur Aufgabe gehört, werden die wichtigen Variablen und Konstanten direkt an den Anfang des Quellcodes in das Hauptprogramm eingegeben. Zu diesen Eingaben gehören:

- die Anzahl der Ebenen und Spalten der Antenne
- die Betriebsfrequenz
- der Name der Datei, die die Konfiguration der Antenne beschreibt (Matrix A, D und Primärdaten)
- die Polarisationssebene
- Auswahl ob mit Fourier-Koeffizienten,  $1^\circ$  oder  $10^\circ$  Schritten der Herstellerdaten gearbeitet werden soll

### Das Programm wurde in folgende Funktionen unterteilt:

- **Diagrammberechnung** (Hauptprogramm)
  - **Einlesen** (der Konfiguration der Antenne)
  - **Winkel** (Winkel-Schleife)
    - **Zeilen und Spalten** (Zeilen-Spalten-Schleife)
      - **Berechne\_hor\_ver\_Ampl\_Fakt** (je nach Elementart wird der horizontale und vertikale Amplitudenfaktor berechnet)
      - **Berechne\_Phase\_Amplitude** (Berechnen und summieren von Phase und Amplitude)
    - **Berechne\_Betrag\_Phase** (Umrechnen in Betrag und Phase und Normierung)
  - **Ausgabe** als Polardiagramm

Das Blockdiagramm entspricht dem des QuickBASIC Programms aus Kapitel 3.1.

### Inhaltliche Änderungen zwischen QuickBASIC und Matlab

Es wurden einige Änderungen des Programms vorgenommen:

1. Um diese Änderung zu erläutern, muss noch einmal auf das QuickBASIC-Programm eingegangen werden.

Die originalen QuickBASIC Zeilen lauten:

```
1881 FOR EW = AV TO EV + SV / 2 STEP SV
```

```
1890 FOR AW = AH TO EH + SH / 2 STEP SH: R = 0: Q = 0
```

Zeile 1881 ist der Schleifenkopf für den Durchlauf des Erhebungswinkels, Zeile 1890 ist der Schleifenkopf für den Durchlauf des Azimutwinkels. Durch die Auswahl des jeweiligen Anfangs- und Endwinkels kann der Benutzer den für ihn relevanten Teil des Antennendiagramms auswählen und die Schrittweite für die Berechnung festlegen. Real- und Imaginärteil werden am Anfang des Durchlaufes von jedem Winkel auf Null gesetzt.

Die Addition der halben Schrittweite (+ SV/2) zum Endwinkel (EV) kann ausgelassen werden. SV/2 wurde im QuickBASIC-Programm verwendet, um bei der Berechnung des Gewinns eine ungerade Schrittzahl zu erzeugen. Dies ist sinnvoll, um bei genau 90° einen Wert im Diagramm zu erhalten, bei dem das Maximum des Vertikaldiagramms liegt. Dies ist für die korrekte Bestimmung des Gewinns erforderlich. Bei einem Anfangswinkel von 0° und einem Endwinkel von 180° und einer geraden Anzahl von Schritten größer 2° wird der Wert für 90° eventuell nicht berechnet.

Da im Matlab-Programm kein Gewinn berechnet wird, kann auf die Addition der halben Schrittweite verzichtet werden. In Matlab wird das Diagramm immer in 1° Schritten dargestellt, weshalb bei 90° ohnehin ein Wert berechnet wird.

2. In Zeile 20130 bis 20180 des QuickBASIC Programms wird eine Umrechnung von B (in Matlab:  $\alpha$ ) und C (in Matlab:  $\beta$ ) in einen anderen Winkelbereich vorgenommen. Durch die Geometrie der Antennendiagramme wiederholen sich die Amplituden bei bestimmten Winkeln. Solange diese Geometrie gegeben ist, können rechnerische Vereinfachungen benutzt werden. Es handelt sich um Spiegelungen an Symmetrieachsen. Bei nicht spiegelsymmetrischen Antennendiagrammen ist das Verfahren generell nicht möglich.

Das QuickBASIC Programm verwendete in der Vergangenheit zur Berechnungsgrundlage nur Primärdaten in einem eingeschränkten Bereich z.B. für  $\varphi$  und  $\vartheta$  Amplituden von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$ . Daher bot es sich zur Vereinfachung an, nur bestimmte Bereiche des Diagramms zu berechnen und die übrigen Amplituden aus der Geometrie zu ermitteln. Heute ist die Umrechnung in den anderen Winkelbereich nicht mehr erforderlich, da Primärdaten für den gesamten Winkelbereich vorliegen. Deshalb wurde dieser Teil nicht in das Matlab Programm übernommen.

### Stilistische Änderungen

Es wurden nahezu alle Variablen aus dem QuickBASIC-Programm für die Implementierung in Matlab umbenannt. Da Matlab ein wesentlich moderneres Programm ist, ist auch das Matlab-Programm anders strukturiert. Die Reihenfolge der Rechenschritte wurde deshalb teilweise geändert. Das ist bedingt durch viele GOTO-Befehle, die das QuickBASIC-Programm unübersichtlich macht. Das wesentliche Prinzip der Berechnungsgrundlagen und der Gleichungen wurden beibehalten und gegebenenfalls erweitert.

## 4.2 Erweitertes Matlab Programm für die Verwendung neuer Herstellerdaten

Die Hersteller liefern inzwischen erweiterte Daten: Die Messwerte von Amplitude und Phase der Antennenelemente werden zum Teil in  $1^\circ$  Schritten zur Verfügung gestellt. Um mit diesen Daten rechnen zu können, musste das Programm erweitert werden. Die bisherigen Rechenwege sollen dabei weiterhin verwendbar bleiben, um Flexibilität zu gewährleisten.

Zusätzlich zu den bisherigen Anforderungen soll das Antennendiagramm aus folgenden Herstellerdaten berechnet werden:

- Amplitude und Phase in  $1^\circ$  Schritten
- Amplitude und Phase in  $10^\circ$  Schritte mit unterschiedlichen Interpolationswegen

In dem QuickBASIC-Programm wurde nicht interpoliert. Dort wurden die Fourier-Koeffizienten verwendet, um eine Auflösung des Antennendiagramms in  $1^\circ$  Schritten zu erhalten, wenn die Primärdaten in  $10^\circ$  Schritten vorliegen.

**Im Matlab-Quellcode müssen für die Berechnung von Amplituden- und Phasenwerten folgende Änderungen eingefügt werden:**

1. Die Hersteller liefern mit den Messwerten der Antennenelemente sowohl die Amplituden als auch die Phasenwerte in Abhängigkeit vom Azimutwinkel. Die Messwerte der Phase wurden in dem alten QuickBASIC Programm nicht direkt verwendet. Sie wurde ersatzweise aus dem Abstand Quellpunkt-Bezugspunkt berechnet. Das war eine Lösung aus der Zeit, als keine Messwerte über die Phase bekannt waren, da die Hersteller diese oft nicht mitlieferten.

Im Matlab Programm werden sowohl die Messwerte der Amplitude als auch die der Phase für die Berechnung benutzt. Das erfordert Änderungen an mehreren Stellen des Programms:

- a) Für die Berechnung des gesamten Phasenwinkels eines Elements am Aufpunkt P muss zu den auch in QuickBASIC verwendeten Werten

- Phase, die aus den horizontalen Längendifferenzen der Montage verursacht wird
  - Phase, die aus den vertikalen Längendifferenzen der Montage verursacht wird
  - ggf.  $+180^\circ$ , falls die Differenz zwischen Erhebungswinkel und dem Neigungswinkel größer als  $90^\circ$  ist
  - Phase des Speisestroms  $\cdot$  Korrekturfaktor (Rechenfrequenz / Nennfrequenz)
- noch der Phasenwinkel aus den Herstellerdaten addiert werden.
- b) Im Gegenzug muss die ursprüngliche Berücksichtigung der Phase aus dem Abstand Quellpunkt-Bezugspunkt entfernt werden. Bei der Berechnung des Abstandes und des Winkels zwischen Antennenmittelpunkt und Mastmittelpunkt gibt es ebenfalls eine Änderung. Die Strecke vom Bezugspunkt des Mastes bis zum Phasenzentrum muss nicht addiert werden.
2. Das Gesamtantennendiagramm wird in der Regel in  $1^\circ$  Schritten dargestellt. Liegen die Werte der Primärdaten in  $10^\circ$  Schritten vor, muss eine Interpolation für die Zwischenwerte erfolgen. Da bei den älteren Antennendaten die Messwerte nur bis  $180^\circ$  bekannt sind, muss zusätzlich eine Spiegelung vorgenommen werden. Dies darf nur bei Daten von Antennenelementen angewendet werden, deren Diagramm symmetrisch ist.
- Um eine bessere Interpolation zwischen  $0^\circ$  und  $10^\circ$  im Antennendiagramm zu ermöglichen, werden Werte von  $340^\circ$  und  $350^\circ$  bei der Interpolation berücksichtigt. Dieser Vorgang wird auch für den Bereich zwischen  $350^\circ$  und  $360^\circ$  angewendet. Dieses Verfahren ermöglicht einen besseren Kurvenverlauf in diesem Bereich des Diagramms, da z.B. für die Spline-Interpolation für einen Kurvenabschnitt mehr Stützstellen als die beiden angrenzenden verwendet werden. Tests mit dieser Methode ergaben eine deutlich größere Übereinstimmung mit dem Verlauf der Kurve aus  $1^\circ$  Messwerten.
3. Die Amplitudenfaktoren über Azimut- und Erhebungswinkel ergeben sich direkt aus den gemessenen Primärdaten. Daher ist eine Bestimmung dieser Faktoren aus den analytischen Gleichungen oder den Fourier-Koeffizienten nicht mehr erforderlich. Wenn nur mit den Primärdaten der Hersteller direkt gearbeitet werden soll, kann die Funktion zur Berechnung der Faktoren aus dem Quelltext entfernt werden.

### Interpolationsmöglichkeiten

Liegen  $10^\circ$  Schritte als Stützstellen für das Einzel-Antennendiagramm vor, kann auf unterschiedliche Weise interpoliert werden. Das QuickBASIC Programm verwendet die Fourier-Koeffizienten, gebildet aus einer Fourier-Reihe, um die Zwischenwerte zu ermitteln. Dabei werden nur die cos-Anteile verwendet, da es sich um eine gerade Funktion handelt. Im erstellten Matlab-Programm können verschiedene Interpolationswege im Quellcode gewählt werden, z.B. linear, spline und cubic. Standard mäßig wird die lineare Interpolation verwendet.

- Lineare Interpolation: Lineare Verbindung der Stützpunkte
- Spline Interpolation<sup>47</sup>: Eine kubische Funktion wird zur Verbindung der Stützstellen verwendet
- Kubische Interpolation: Eine kubische Hermiteinterpolation wird zur Verbindung der Stützstellen verwendet. Dabei werden auch die Ableitungen der Funktion an den Stützstellen verwendet.

Alle drei Interpolationswege sind Matlab-Funktionen.

Ein Vergleich der Ergebnisse erfolgt im folgenden Kapitel.

---

<sup>47</sup> Hanke-Bourgeois / Schappel / Gebauer, 2004

## 5 Verifikation des Matlab-Programms

Die folgende Verifikation soll zeigen, dass das erstellte Matlab-Programm der Spezifikation entspricht.

In diesem Kapitel werden drei Tests des Programms durchgeführt. Von Gruppenantennen der Rundfunksender liegen meist, nach der Montage am Mast, keine kompletten Diagramme vor. Sie können nicht mit einfachen Hilfsmitteln gemessen werden: Für solche Messungen wird ein Hubschrauber benötigt. Deswegen sind direkte Vergleiche zwischen Simulation und Realität oft nicht möglich. Außerdem gibt es nur wenige Datensätze und Diagramme von Einzelantennen mit denen Vergleichsrechnungen sinnvoll durchgeführt werden können. Es wurden dazu folgende Tests des Matlab-Programms durchgeführt:

Test 1 Im ersten Test wird ein Vergleich der Antennendiagramme mit Gleichungen aus der Literatur durchgeführt. Es soll gezeigt werden, dass der im Matlab-Programm verwendete Rechenweg äquivalente Antennendiagramme liefert (Kapitel 5.1.1).

Test 2 Im zweiten Test werden die drei unterschiedlichen Rechenwege des Programms verglichen. Für die Berechnungen werden jeweils dieselben Primärdaten verwendet, wobei die Daten in Unterschiedlicher Form und Genauigkeit vorliegen (Kapitel 5.1.2).

Die drei Rechenwege zur Bestimmung von Antennendiagrammen sind:

1. 1° Schritte der Primärdaten
2. 10° Schritten der Primärdaten mit verschiedenen Interpolationswegen
3. Fourier-Koeffizienten (bestimmt aus 10° Schritten) als Primärdaten

Test 3 Im dritten Test werden Messungen im Freifeld durchgeführt. Es gibt derzeit keine komplett ausgemessenen Gesamtantennen, von denen die Antennendiagramme der Einzelelemente in hoher Auflösung bekannt sind. Deswegen werden in diesem Test von einer Einzelantenne im Freifeld zunächst die Primärdaten in 5° Schritten ausgemessen. Dieser Datensatz kann im Programm anschließend verwendet werden, um Gruppendiagramme zweier gleicher Elemente zu berechnen.

Zur Prüfung der berechneten Diagramme werden zwei Antennenelemente des gleichen Typs in unterschiedlichen Anordnungen montiert und das Gesamtdiagramm jeweils experimentell bestimmt.

Die gewonnenen Ergebnisse werden abschließend mit den Berechnungen des Programms verglichen (Kapitel 5.2).

### Kriterien für den Vergleich der Testergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Richtlinien der Testergebnisse definiert.

Test 1 Da das Programm die Gleichungen aus der Literatur nachbildet, wird hier eine gute Übereinstimmung erwartet. Mit dem Horizontalkorrekturfaktor kann eine eventuell erforderliche Anpassung der Keulbreite durchgeführt werden. Die Abweichungen sollten kleiner als 5 % sein.

Test 2 Die drei Rechenwege zur Bestimmung von Antennendiagrammen basieren auf gleichen Primärdatensätzen. Deswegen wird hier eine nahezu perfekte

Übereinstimmung erwartet. Falls Abweichungen von mehr als 5% auftreten, können Messwerte aus der Praxis zur Entscheidung beitragen, welcher Weg die besten Ergebnisse liefert.

Test 3 In diesem Test werden nur auf den Maximalwert normierte Werte verglichen. Im Freifeld gemessene Werte können nicht als fehlerfrei angesehen werden, da die folgenden Fehlerquellen existieren:

- Ausrichtfehler,
- Reflexionen an umgebenden Gegenständen,
- Bodenleitfähigkeit,
- störende Sender mit gleicher Frequenz wie die im Versuch verwendete
- Messungenauigkeiten des Network-Analyzers

Eine 100-prozentige Übereinstimmung kann daher nicht erwartet werden. Dennoch wird eine Abweichung kleiner 5% zwischen den Ergebnissen des Matlab-Programms und der Messung erwartet.

## 5.1 Verifikation durch Simulationen

In Test 1 und Test 2 werden die Ergebnisse des Programms mit Ergebnissen der Theorie konfrontiert. Verglichen werden Diagramme, die in 1° Schritten geplottet wurden.

Die folgenden Verfahren zur Berechnung von Antennendiagrammen werden überprüft:

- a. Verwendung von den in Abschnitt 3.4.4 diskutierten Gleichungen des QuickBASIC-Programms
- b. Verwendung von Herstellerdaten (Amplitude und Phase) in 1° Schritten
- c. Verwendung von Herstellerdaten (Amplitude und gegebenenfalls die Phase) in 10° Schritten

Für das unter c. untersuchte Verfahren gibt es unterschiedliche Wege zur Ermittlung der Zwischenwerte bei der Verwendung von 10° Schritten:

- Lineare Interpolation
- Kubische Interpolation (Spline)
- Fourier-Reihen

In der Vergangenheit wurden meistens die Primärdaten auf der Basis von 10° Schritten verwendet. Daraus wurden Fourier-Koeffizienten ermittelt, mit denen im Folgenden das gesamte Diagramm berechnet wurde.

Erst in der Matlab-Version des Antennenprogramms werden die 10° Schritte direkt verwendet und Zwischenwerte interpoliert.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Interpolation und Fourier-Reihen ist, dass bei Verwendung der Fourier-Koeffizienten nur die Amplituden berechnet werden. Die Phase wird anhand des Quellpunktabstandes vom Bezugspunkt berechnet. Dies ist historisch bedingt: Anfangs lieferten die Antennenhersteller nur die Amplituden in 10° Schritten z.B. als Katalogangaben, nicht aber die dazugehörigen Phasenwinkel. Hilfsweise wurde stattdessen anhand von Erfahrungswerten die Entfernung Quellpunkt-Bezugspunkt zur Berechnung der Phase herangezogen.

Im Folgenden werden die oben erwähnten Verfahren überprüft.

## 5.1.1 Vergleich der Rechenwege mit Gleichungen aus der Literatur

### Durchführung Test 1

In diesem Kapitel werden die Rechenwege des Matlab-Programms mit Gleichungen aus der Literatur verglichen. Hier kann jedoch nur ein Teil des Programms getestet werden, da nicht für alle Antennentypen Gleichungen in der Literatur zu finden sind. In der Literatur werden für die Berechnung des Gesamtdiagramms von Antennengruppen fast ausschließlich Dipole verwendet. Bei dem hier durchgeführten Test wurden deshalb nur Dipolgruppen betrachtet.

Weil die Unterschiede im Programmablauf bei den verschiedenen Konfigurationen sehr gering sind, kann dennoch das gesamte Konzept des Programms überprüft werden.

Gewählt wurde die Anordnung von zwei horizontal polarisierten Dipolen in einer horizontalen Dipolzeile. Abbildung 41 stellt diese Anordnung dar.

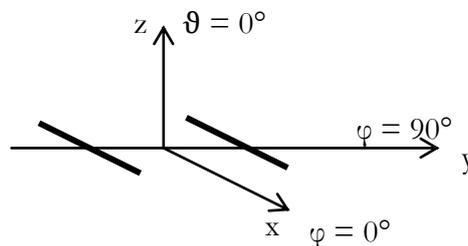


Abbildung 41: Anordnung der zwei horizontalen Dipole

In Matlab wurden die beiden Rechenwege, Verwendung der QuickBASIC-Gleichungen und Verwendung der Gleichungen aus der Literatur, nachgebildet. Der Quellcode befindet sich im Anhang D.

## Gleichungen zur Berechnung des Antennendiagramms

### 5.1.1.1 Phasenrichtige Addition der Amplituden der Dipole (QuickBASIC Weg):

Das Antennendiagramm eines einzelnen Dipols wird mit Gleichung 3-8 berechnet:

$$C = \frac{\cos(\varphi) + \text{Horizontalkorrektur-Faktor} \cdot \cos(3\varphi)}{1 + \text{Horizontalkorrektur-Faktor}} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Auf diese Gleichung wurde in Kapitel 3 genauer eingegangen. Das Gesamtdiagramm ergibt sich aus der phasenrichtigen Addition der Einzelfelder, ebenfalls gemäß Kapitel 3.

### 5.1.1.2 Die Gleichung aus der Literatur

In Kapitel 2.5 wurden Gleichungen für Dipolgruppen aus der Literatur behandelt, die Dipolgruppen berechnen. In der hier verwendeten Gleichung 5-1 gibt es im Gegensatz zu den bisherigen Gleichungen die Möglichkeit einer phasenverschobenen Einspeisung zwischen den Dipolen.

Das Antennendiagramm lässt sich mit folgender Gleichung bestimmen:

$$\mathbf{c} = \underbrace{\sin(\varphi)}_{\text{Einzeldipol}} \left| \underbrace{2 \cos\left(\frac{\delta_0}{2} + \frac{\pi d}{\lambda} \sin(\varphi)\right)}_{\text{Gruppencharakteristik}} \right| \quad \text{Gleichung 5-1}^{48}$$

Die Herleitung dieser Gleichung folgt im anschließenden Abschnitt.

Dabei ist  $\delta_0$  die Phasendifferenz der Speiseströme und  $d$  ist der Abstand der Dipole zueinander.

Da es sich um horizontale Hertzsche Dipole handelt, ergibt sich das Einzelantennendiagramm nach Gleichung 2.1-12 zu  $\mathbf{C} = \sin(\varphi)$ .

Bei zwei Dipolen ergibt sich die Gesamtfeldstärke aus der Summe der Einzelfeldstärken.

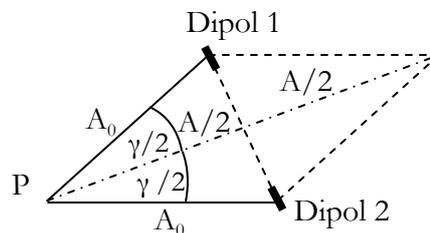


Abbildung 42: Vektorielle Addition

Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Stirner, 1984, S.47

Die vektorielle Addition lässt sich durch Gleichung 5-2 darstellen

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 \sin(\varphi) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \mathbf{A}_0 \sin(\varphi) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad \mathbf{c} = \frac{A}{A_0} \quad \text{Gleichung 5-2}^{49}$$

$$\mathbf{c} = 2 \sin(\varphi) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad \text{Gleichung 5-3}^{50}$$

$$\mathbf{c} = \sin(\varphi) \left| 2 \cos\frac{\gamma}{2} \right| \quad \text{Gleichung 5-4}^{49}$$

Neben dem Phasenunterschied durch unterschiedliche Speisung muss der Phasenunterschied durch den Wegunterschied der Antennen zum Punkt P berücksichtigt werden. Um diesen zu bestimmen dient folgende Überlegung:

Wenn  $\varphi$  und  $\vartheta = 90^\circ$  sind, ist der Wegunterschied  $\Delta r$  gleich dem Abstand der Dipole  $d$ .

Ist  $\varphi$  oder  $\vartheta = 0^\circ$  folgt für  $\Delta r = 0$

$$\Delta r = d \sin(\varphi) \sin(\vartheta) \quad \text{Gleichung 5-5}^{49}$$

Aus  $\Delta r$  ergibt sich der Phasenunterschied  $\delta_{\text{weg}}$  am Punkt P gemäß:

$$\delta_{\text{weg}} = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda_0} \quad \text{Gleichung 5-6}^{49}$$

<sup>48</sup> Quelle, Stirner, 1984, S. 48

<sup>49</sup> Quelle: Striner, 1984, S.48

<sup>50</sup> Quelle: Striner, 1984, S.47

Zusätzlich zum Phasenunterschied aus der Wegdifferenz ist eine Phasendifferenz der Speiseströme  $\delta_0$  zu berücksichtigen. Der Gesamtphasenunterschied ergibt sich aus der Summe.

Die gesamte Phasendifferenz  $\delta$  ist:

$$\delta = \delta_0 + \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} \quad \text{Gleichung 5-7}^{49}$$

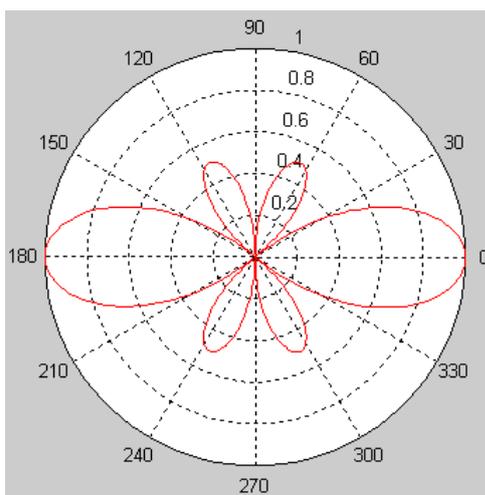
Nach Einsetzen von Gleichung 5-7 in Gleichung 5-4 ergibt sich daraus die schon zu Beginn erwähnte Gleichung 5-1:

$$C = \sin(\alpha) \cdot \left| 2 \cdot \cos\left(\frac{\delta_0}{2} + \frac{\pi a}{\lambda} \sin(\varphi)\right) \right| \quad \text{Gleichung 5-1}^{49}$$

Im Horizontaldiagramm wird  $\vartheta = 90^\circ$ , deswegen wird  $\sin \vartheta = 1$ .

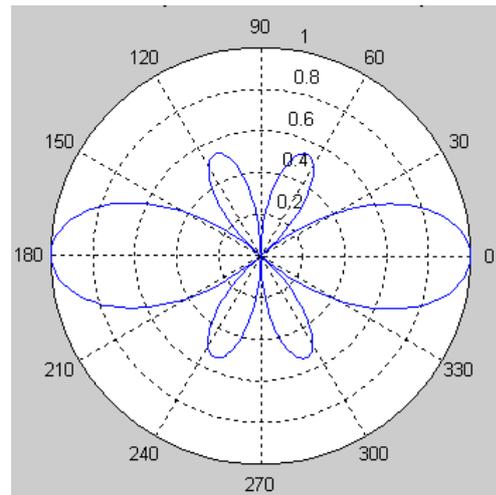
### 5.1.1.3. Vergleich der beiden Rechenwege

Durch die geeignete Wahl des Horizontalkorrekturfaktors nähern sich die Antennendiagramme gut aneinander an. Bei einem einfachen Dipol ergab sich für den Horizontalkorrekturfaktor von ca. 0,6 die beste Übereinstimmung. Nach den Erkenntnissen der Entwickler des Programms, soll der Horizontalkorrekturfaktor für Dipole mit 0,047 gewählt werden.



**Abbildung 43: Horizontales Antennendiagramm zweier horizontaler Dipole mit dem Matlab-Programm  
Horizontalkorrekturfaktor = 0,047**

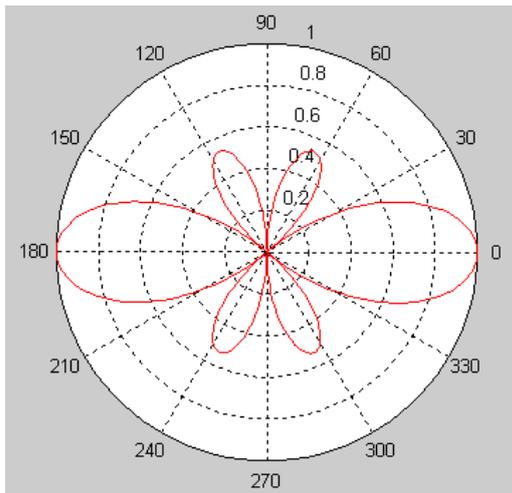
Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab



**Abbildung 44: Horizontales Antennendiagramm zweier horizontaler Dipole nach Formeln aus der Literatur,  
Gleichung 5-1**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Aus Abbildung 43 und Abbildung 44 ist ersichtlich, dass der Horizontalkorrekturfaktor von 0,047 nicht optimal gewählt ist. Eine sehr gute Übereinstimmung der Diagramme erreicht man mit einem Horizontalkorrekturfaktor von 0,03.



**Abbildung 45: Horizontales Antennendiagramm  
zweier horizontaler Dipole,  
Horizontalkorrekturfaktor = 0,03**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Unterschiede sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 sind schwer erkennbar.

### Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse von Test 1 „Vergleich der Rechenwege mit Gleichungen aus der Literatur“:

Durch die Dipol-Näherungsformel aus dem QuickBASIC-Programm, mit der die phasenrichtige Addition arbeitet, war keine 100% Übereinstimmung der beiden Rechenwege zu erwarten.

Die durchschnittliche Abweichung der beiden Rechenwege liegt bei etwa ca. 3% bei den Horizontalkorrekturfaktoren 0,03 und 0,047. Bei einem Horizontalkorrekturfaktor von 0,03 ist die Abweichung in den Hauptkeulen kleiner als 1 %. In den Nebenkeulen steigt die Abweichung auf über 5%. Da die Hauptkeulen als das entscheidene Kriterium betrachtet werden, kann das Ergebnis als gut beurteilt werden.

Solange die Diagramme nur optisch betrachtet und nicht zu weiteren Berechnungen genutzt werden, reicht die Näherungsformel zur Berechnung des Antennendiagramms aus. Es sollte bei neuen Dipolanordnungen immer einen Vergleich mit den Diagrammen, die mit den Gleichungen aus der Literatur berechnet wurden, durchführt werden. Dieser Vergleich ist wichtig, um gegebenenfalls eine Anpassung des Horizontalkorrekturfaktors durchzuführen. Jedoch ist auch bei einem weit vom Optimum liegendem Horizontalkorrekturfaktor die Lage der Haupt- und Nebenkeulen korrekt. Die Werte können jedoch erheblich abweichen.

Alternativ kann der Horizontalkorrekturfaktor durch die in Kapitel 3.4.2 erwähnten Tabellen bestimmt werden. Dafür ist es erforderlich, von den Primärdaten der Antennen die Amplitude von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  zu kennen.

Die Gleichungen aus der Literatur haben trotz ihrer vermutlichen größeren Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Wert Nachteile. Für beliebige geometrische Anordnungen müssten jeweils neue Gleichungen hergeleitet werden. Die in QuickBASIC verwendete Gleichung bleibt dagegen, abgesehen von einer eventuell erforderlichen Anpassung des Horizontalkorrekturfaktors, gleich. Daher kann nur dieser Weg für die Berechnungen von beliebigen Antennengruppen verwendet werden.

## 5.1.2 Evaluierung der verschiedenen Rechenwege unter Verwendung von Primärdaten

Gesamtantennendiagramme können aus Primärdaten, bestehend aus Amplitude und Phase, berechnet werden. Die Primärdaten liegen in

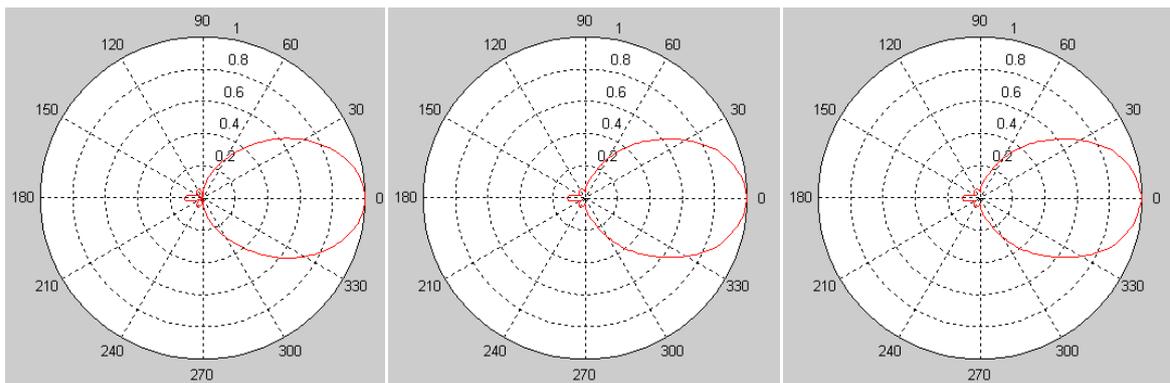
- $1^\circ$  Schritten,
- $10^\circ$  Schritten unter Anwendung verschiedener Interpolationswege auf  $1^\circ$  Schritte und
- Fourier-Koeffizienten, bestimmt aus  $10^\circ$  Schritten,

vor.

Es ist möglich, einen direkten Vergleich zwischen Diagrammen der drei Rechenwege durchzuführen. Um die Zwischenwerte der  $10^\circ$  Schritte zu erhalten, wurden eine lineare und eine Spline-Interpolation durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden die Antennendiagramme aus diesen Berechnungswegen verglichen.

### Vergleich von Antennendiagrammen eines Einzelelementes

Bevor die Unterschiede der Gruppenantenne untersucht werden, werden zunächst in den Abbildung 46 bis 48 ein einzelnes Antennenelement verglichen. Es zeigt sich, dass alle drei Abbildungen sehr ähnlich sind.



**Abbildung 46:**  
Antennendiagramm  
berechnet mit Fourier-  
Koeffizienten

**Abbildung 47:**  
Antennendiagramm  
berechnet aus einer  
Tabelle mit  $1^\circ$  Schritten

**Abbildung 48:** Antennendiagramm  
berechnet aus einer Tabelle mit  
 $10^\circ$  Schritten und lineare  
Interpolation

Jeweils ein einzelnes Antennenelement, Frequenz: 550 MHz, Antennentyp: K723147

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

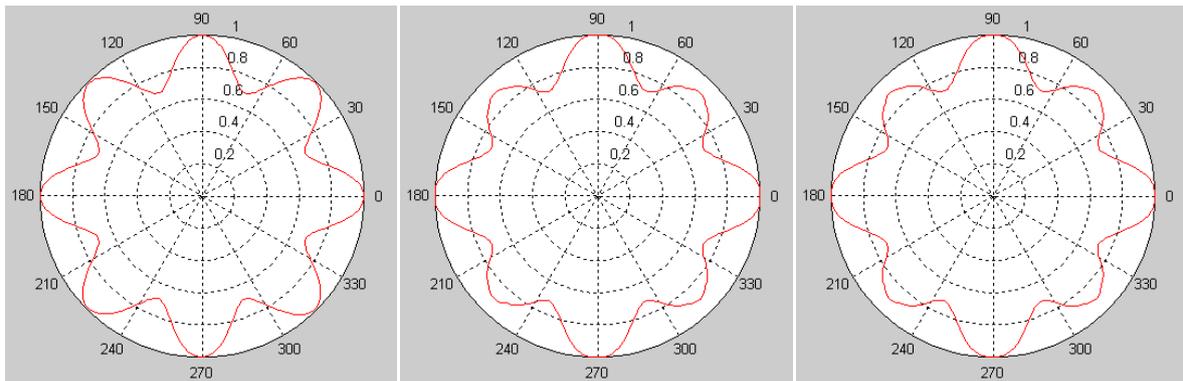
Da der alternative Spline-Interpolationsweg ein annähernd identisches Diagramm ergibt, ist auf diese Darstellung verzichtet worden.

## Untersuchung von vier Einzelementen in einer Ebene

In einem zweiten Schritt werden vier Einzelemente in einer Ebene zu einem gesamten Antennendiagramm zusammengefügt.

Für alle Diagramme gilt:

- Strahlrichtung der Einzelemente:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$
- Speisung gleichphasig
- Neigungswinkel der Antennen =  $0^\circ$



**Abbildung 50:**  
Antennendiagramm berechnet mit Fourier-Koeffizienten

**Abbildung 51:**  
Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit  $1^\circ$  Schritten

**Abbildung 49:**  
Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit  $10^\circ$  Schritten und lineare Interpolation

**Horizontaldiagramm für jeweils 4 Antennenelement in einer Ebene, Abstand zum Antennenmastmittelpunkt: 0,3 m; Frequenz: 550 MHz; Antennentyp: K723147**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Der Vergleich dieser drei Diagramme zeigt, dass unter der Verwendung von Fourier-Koeffizienten (Abbildung 50) eine signifikante Abweichung gegenüber den anderen beiden Rechenwegen (Abbildung 51 und Abbildung 49) besteht.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Interpolationsverfahren sind äußerst gering und die Diagramme werden daher im Vergleich nicht dargestellt.

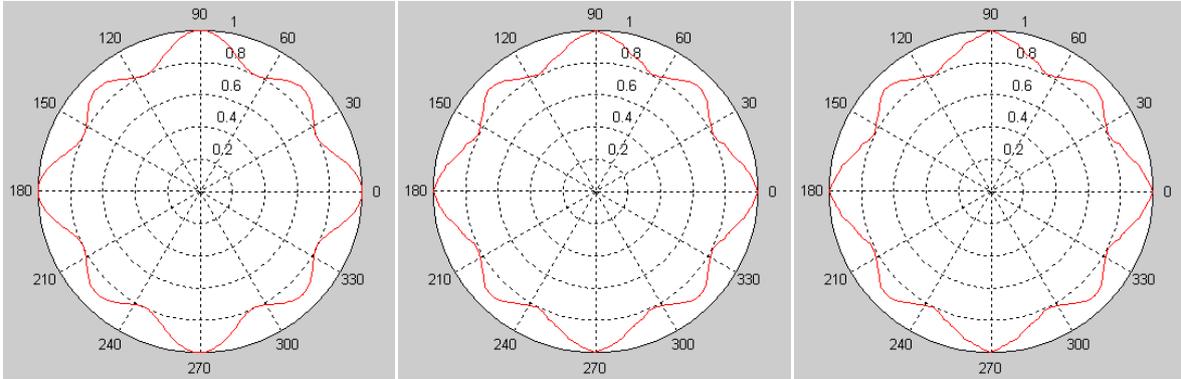
### Erklärung für die Abweichung zwischen den Ergebnissen unter Verwendung der Fourier-Koeffizienten und $1^\circ$ bzw. $10^\circ$ Schritten

Die Ergebnisse zwischen den Fourier-Reihen und den Matlab-Interpolationen unterscheiden sich zum Teil erheblich, da bei der Verwendung der Fourier-Reihen nur die Amplituden mit einer Fourier-Reihe ermittelt werden. Die Phase wird über den Abstand zum Quellpunkt berechnet. Bei den verschiedenen Interpolationswegen von Matlab werden sowohl die Amplitude als auch die Phase interpoliert. Dies ermöglicht eine genauere Berechnung und ist zudem rechnerisch einfacher umzusetzen.

Die vorliegenden Herstellerdaten in  $1^\circ$  Schritten für das Antennenelement K723147 sind möglicherweise aus  $10^\circ$  Schritten interpolierte Werte. Sie stimmen zwar mit keinem der getesteten Interpolationswege von Matlab exakt überein, die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Die Werte von  $181^\circ$  bis  $359^\circ$  der Primärdaten sind exakt die gespiegelten Werte des

ersten Halbkreises. Daher ist zu vermuten, dass der Antennenhersteller nur die Amplitude und Phase in  $10^\circ$  Schritten von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  ausgemessen und die weiteren Werte errechnet hat.

Wird der Abstand der Elemente zum Antennenmastmittelpunkt auf 0,2 m geändert, ergibt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung der drei Rechenwege.



**Abbildung 54:**  
Antennendiagramm berechnet mit Fourier-Koeffizienten

**Abbildung 53:**  
Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit  $1^\circ$  Schritten

**Abbildung 52:** Antennendiagramm berechnet aus einer Tabelle mit  $10^\circ$  Schritten und lineare Interpolation

**Horizontaldiagramm für jeweils 4 Antennenelement in einer Ebene, Abstand zum Antennenmastmittelpunkt: 0,2 m; Frequenz: 550 MHz; Antennentyp: K723147**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Hier sind Unterschiede selbst im direkten grafischen Vergleich schwer zu erkennen. Es kann daraus geschlossen werden, dass bei kleinen Abständen der Antennen zum Mittelpunkt alle drei Rechenwege ein gutes Ergebnis liefern. Bei größeren Abständen ist dies nicht der Fall.

Es ist anzunehmen, dass das Diagramm, berechnet aus Primärdaten in  $1^\circ$  Schritten, die beste Wiedergabe des realen Diagramms zeigt. Die Behauptung kann aufgestellt werden, da dieser Rechenweg sowohl Amplitude als auch Phase der Primärdaten verwendet und keine Interpolation durchgeführt wird.

### Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse von Test 2 „Evaluierung der verschiedenen Rechenwege unter Verwendung von Primärdaten“

Für eine Bewertung der Diagramme müsste ein Vergleich mit Messwerten eines Antennenmastes mit vier Spalten und einer Ebene durchgeführt werden. Leider gibt es kaum Messungen aus der Praxis, da diese sehr aufwendig und teuer sind. Für bekannte ausgemessene Diagramme gibt es demgegenüber fast keine Primärdaten mit Phase und Amplitude in  $1^\circ$  Schritten. Deswegen wird nur ein Vergleich zwischen einem realem Antennendiagramm und einer Simulation durchgeführt. Weitere Vergleiche zwischen Simulation und realer Messung werden in Kapitel 5.2 durchgeführt.

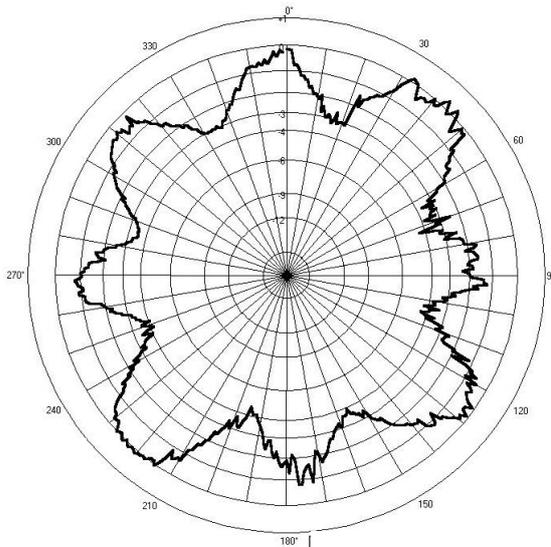


Abbildung 55: Hubschraubermessung, 618 MHz, untere Halbantenne

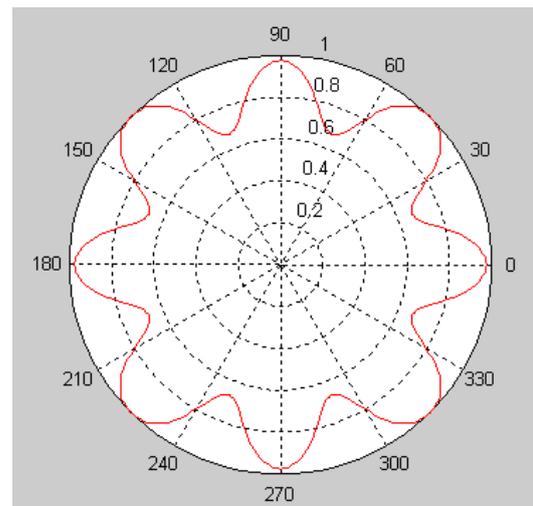


Abbildung 56: Simulation mit Matlab, Berechnet aus einer Tabelle in  $1^\circ$  Schritten, 618 MHz, eine Antennenebene

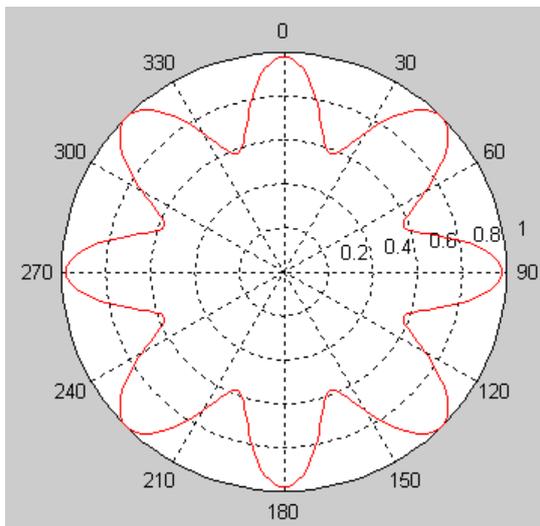


Abbildung 57: Simulation mit Matlab, Berechnet aus Fourier-Koeffizienten, 618 MHz, eine Antennenebene

Das Diagramm der Messungen aus der Praxis in Abbildung 55 haben in den  $45^\circ$  voneinander entfernten Maxima unterschiedliche Werte. Dies hat große Ähnlichkeit mit den Berechnungen unter Verwendung von Tabellenwerten mit  $1^\circ$  und  $10^\circ$  Schritten. Dieser Vergleich zeigt, dass das Diagramm, berechnet aus Primärdaten in  $1^\circ$  nach Abbildung 56 eine bessere Übereinstimmung mit der Praxis hat, als die Antennendiagramme berechnet aus Fourier-Koeffizienten.

Daher sind die Fourier-Koeffizienten der direkten Verwendung der Primärdaten in  $1^\circ$  oder  $10^\circ$  Schritten zur Berechnung des Antennendiagramms unterlegen.

Eine aufwendige kubische Interpolation liefert nur geringfügig abweichende Werte gegenüber der linearen Interpolation. Daher ist es ausreichend eine lineare Interpolation zwischen den  $10^\circ$  Schritten der Primärdaten zu verwenden.

## 5.2 Verifizierung des Matlab-Programms durch Test in der Praxis

In diesem Kapitel werden Antennendiagramme mit dem Matlab-Programm berechnet und mit Ergebnissen aus Messungen des Freifeldes verglichen.

Da für die verwendeten Antennen keine Primärdaten (Amplitude und Phase bei einer gewählten Frequenz) vorliegen, werden sie im Freifeld zunächst bestimmt. Diese Daten werden im Matlab-Programm später als Primärdaten verwendet. Die Simulationen werden für verschiedene Antennenanordnungen in einer Ebene und zwei Spalten berechnet. Im Anschluss werden die Antennendiagramme für die bestimmten Anordnungen in der Praxis ausgemessen. Es wird eine gute Übereinstimmung erwartet.

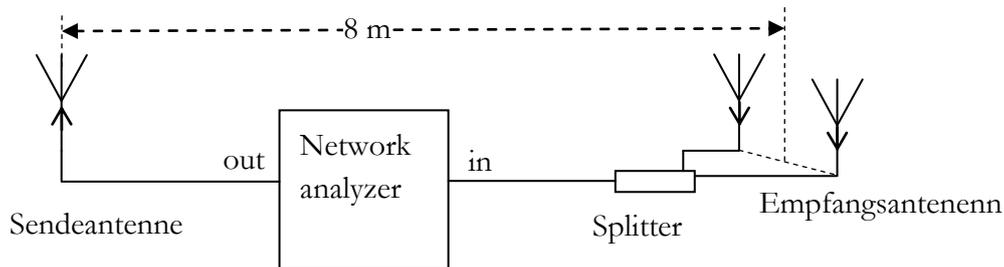


Abbildung 58: Messaufbau

### Komponenten der Messungen

#### Messgeräte:

- Network Analyzer: 8714ET Hersteller: Aglient (300 kHz bis 3000 MHz)
- Network Analyzer: 8753D Hersteller: Hewlett Packard (30 kHz bis 3 GHz)

#### Antennen:

- 2 x Flachantenne für 70 cm (420 bis 450 MHz), TYP: PA-70R<sup>51</sup>, Hersteller: WiMo, Antennenart: Quadloop, verwendet als Empfangsantennen
- 1 x Typ FT01 Funkmesswagenantenne<sup>52</sup>, Hersteller: WISI, mögliche Arbeitsbereiche zwischen 47 MHz und 860 MHz, Öffnungswinkel ca. 35° bei 470 MHz, verwendet als Sendeanenne

#### Sonstige Komponenten:

- Leistungsteiler (Splitter): 470 MHz bis 860 MHz, Hersteller: Kathrein, Typ: 768331
- Koaxialleitungen 50Ω
- Ausziehleitung für Messungen mit Phasenverschiebungen
- Koaxialadapter

<sup>51</sup> WiMo

<sup>52</sup> WISI

## 5.2.1 Charakterisierung der verwendeten Komponenten für die Messungen

Die Freifeldmessung soll bei einer Frequenz von 434 MHz durchgeführt werden. Diese Frequenz wurde gewählt, um niemanden unzulässig zu stören. Um ihre Eignung für die Messung nachzuweisen, werden im folgenden Abschnitt die Komponenten für die Messung bei dieser Frequenz charakterisiert. Außerdem wird für den Leistungsteiler, die Koaxialleitungen, die Ausziehleitung und die Adapter die Phasenverschiebung festgestellt. Diese Werte sind für Messungen mit phasengleichen und phasenverschobenen Speiseströmen notwendig.

### 5.2.1.1 Antennen

**Empfangsantennen:** Bei den beiden Empfangsantennen handelt es sich um Quadantennen vom Typ PA-70R<sup>53</sup>. Sie sind für einen Frequenzbereich von 420 bis 450 MHz ausgelegt.

Die Reflexion der Antennen wurde gemessen, um festzustellen, in welchem Frequenzbereichen die Antenne angepasst ist.

#### Einstellungen am Network Analyzer:

Sweep: 400 MHz bis 800 MHz,

Number of points (Auflösung): 1601

Power: 0 dBm

#### Messung:

Vor der S11 Messung wurde der Network Analyzer inklusive der Leitung zur Antenne kalibriert. Die Antenne wurde bei geöffnetem Fenster auf das Fensterbrett gestellt um eine möglichst ungestörte Ausbreitung des Feldes zu erreichen.

#### Messergebnisse:

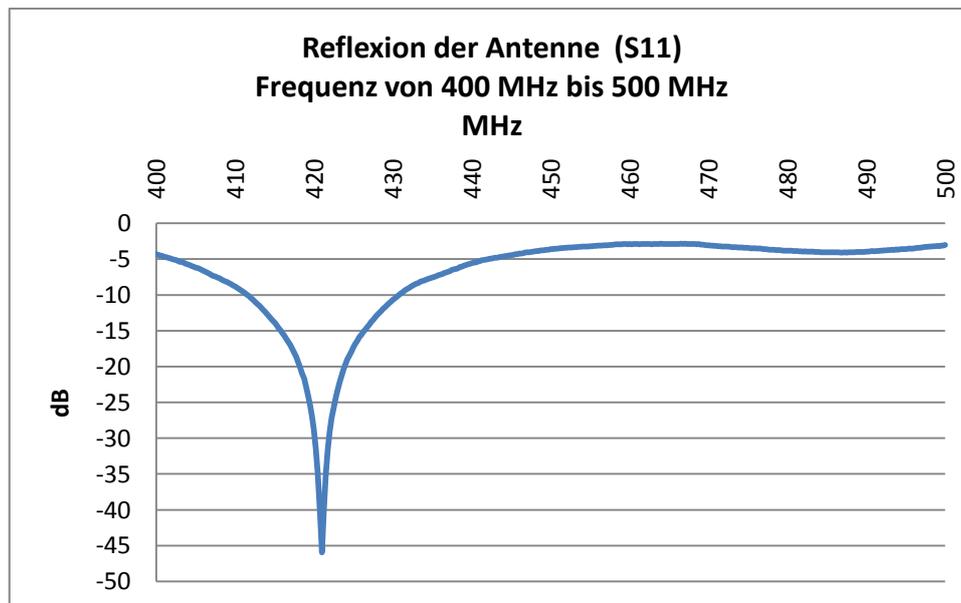


Abbildung 59: Reflexion der Antenne

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

<sup>53</sup> WiMo

Als akzeptable Anpassung für die Versuche gilt eine Reflexionsdämpfung von kleiner als -10 dB. Im Frequenzbereich von ca. 410 MHz bis 430 MHz ergibt sich bei der Messung ein Wert für die Reflexion von unter -10 dB. Damit ergibt sich eine Bandbreite von nur 20 MHz. Bei ca. 420MHz wird ein Wert von etwa -45dB erreicht. Bei der Frequenz von 450MHz wurde ein Wert von ca. -3,7 dB gemessen. Der Wert ist zu groß dafür, dass die Antenne eigentlich für einen Frequenzbereich von 420 MHz bis 450 MHz spezifiziert ist. Typisch sind Werte um -20dB für eine gute Anpassung von Antennen<sup>54</sup>.

#### Fazit:

Messungen bei 434 MHz sind vertretbar, wenn auch nicht optimal.

**Sendeantenne:** Die Sendeantenne vom Typ FT01 wurde nicht charakterisiert. Nach dem Datenblatt kann die Antenne in einem Frequenzbereich von 47 MHz und 860 MHz verwendet werden. Bei 470 MHz beträgt der Öffnungswinkel ca. 35°.

#### 5.2.1.2 Leistungsteiler (Splitter)

Der Durchgang und die Reflexion des Splitters wurde mit dem Network Analyzer mit Hilfe der S21 und der S11 Messung analysiert. Da dieser nur für den Bereich von 470 MHz bis 860 MHz spezifiziert ist, musste das Verhalten für die in der Messung verwendete Frequenz von 434 MHz charakterisiert werden.

#### Einstellungen am Network Analyzer:

Sweep: 400 MHz bis 800 MHz,

Number of points: 1601

Power: 0 dBm

#### Messungen:

Es wird eine S11 und eine S21 Messung durchgeführt.

#### Messaufbau S11:

Vor der Messung wurde der Analyzer inklusive der Leitungen zum Splitter kalibriert. Damit wird erreicht, dass die Anschlussleitungen keinen Einfluss auf die Messung des Splitters haben. Die beiden Ausgänge wurden mit 50  $\Omega$  abgeschlossen.

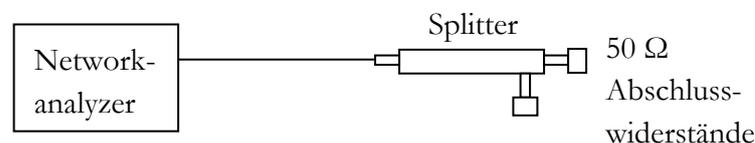


Abbildung 60: Messaufbau S11 für die Charakterisierung des Splitters

<sup>54</sup> Zwirello, 2009

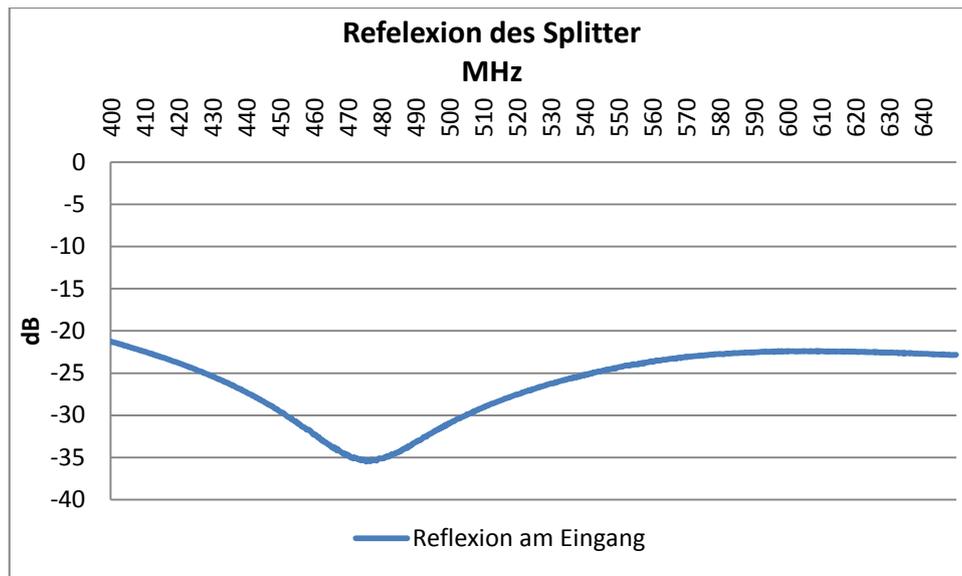


Abbildung 61: Reflexion des Splitters

Quelle: Eigene Darstellung der Messergebnisse mit Excel

**Messergebnisse:** Die Reflexion liegt im gesamten Frequenzbereich unter -20 dB und hat ein Minimum von ca. -35 dB bei Frequenzen um 470 MHz. Bei der Frequenz 434 MHz, die später für die Messung verwendet wird, liegt die Reflexion bei unter -25 dB. Der Splitter kann demnach für die Messung verwendet werden.

**Messaufbau S21:** In der nächsten Messung wurde die Transmissionsdämpfung des Splitters ermittelt.

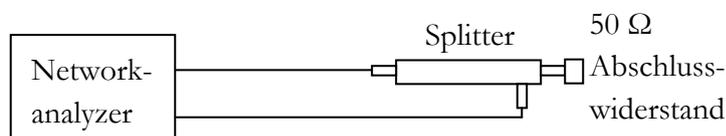


Abbildung 62: Messaufbau S21 für die Charakterisierung des Splitters

Der Network Analyzer wurde für die Messung so kalibriert, dass die Anschlussleitungen auf das Messergebnis keinen Einfluss haben. Der Messaufbau ist in Abbildung 62 dargestellt. Die beiden Ausgänge wurden nacheinander gemessen, wobei der jeweils unbenutzte mit 50  $\Omega$  abgeschlossen war.

**Messergebnisse:** Es wurde eine Transmissionsdämpfung von ca. -3 dB gemessen. Dieser Wert war zu erwarten, da die Leistung auf beide Ausgänge gleichmäßig aufgeteilt wird und somit halbiert wird.

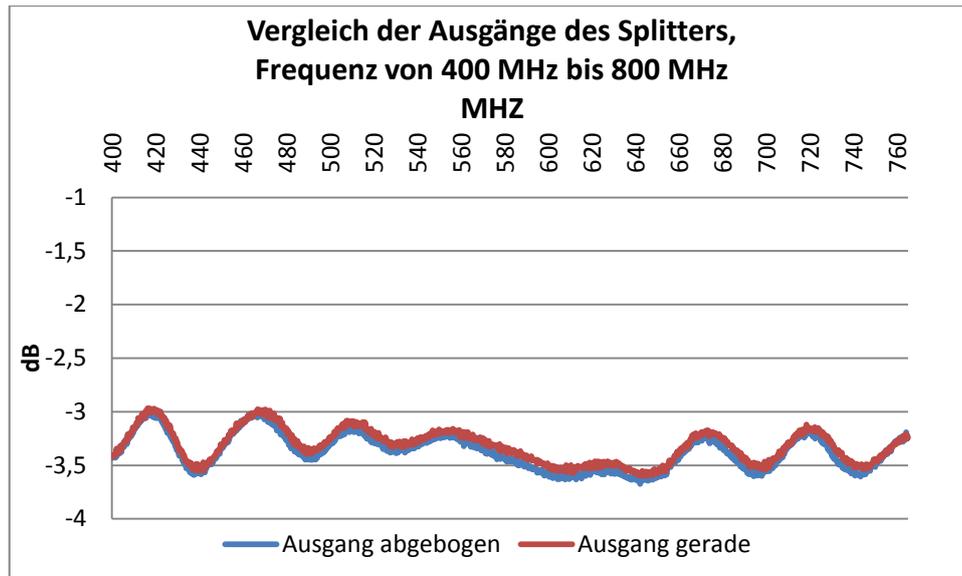


Abbildung 63: Transmission des Splitters

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Es zeigt sich, dass die beiden Wege in dem Splitter leicht unterschiedlich bezüglich der Durchgangsdämpfung sind. Der gerade Weg durch den Splitter hat eine bis zu 0,15 dB niedrigere Transmissionsdämpfung als der abgewinkelte. Das Verhalten über den Frequenzbereich ist sehr ähnlich.

**Fazit:** Der Splitter kann nach den Erkenntnissen aus Reflexions- und Transmissionsmessung bei 434 MHz verwendet werden.

#### Phasenverschiebung des Splitters:

Für eine spätere Messung der Antennen mit phasenverschobenen Speiseströmen, muss die Phasenverschiebung des Splitters bestimmt werden.

Die beiden Anschlüsse auf der geteilten Seite des Splitters sind unterschiedlich von der Art des Anschlusses. Der eine Anschluss kann direkt mit einem Kabel verbunden werden, der andere kann nur über einen Adapter von N-Buchse auf N-Buchse angeschlossen werden.

**Messaufbau zum Ermitteln der Phasenverschiebung:** Der Messaufbau aus Abbildung 62 bleibt erhalten. Beide Anschlussleitungen sind aus der Messung herauskalibriert.

In der S21 Messung wird die Phase dargestellt und die Phasenverschiebung bei 434 MHz abgelesen.

**Messergebnisse:** Die Phasenverschiebung der zwei Wege im Splitter ist unterschiedlich:

|                          | Reale Phasenverschiebung mit den unterschiedlichen Anschlüssen |
|--------------------------|--|
| Ausgang abgewinkelt      | 281°   |
| Ausgang gerade + Adapter | 301°   |

Tabelle 5: Vergleich der Phasenverschiebung der beiden Wege im Splitter

Der Unterschied der Phasenverschiebung ist klar auf die Verwendung des zusätzlichen Adapters zurückzuführen, da dieser eine Phasenverschiebung von ca. 19° verursacht.

### 5.2.1.3 Ausmessen der verwendeten Leitungen

Die Phasenverschiebung der in der Messung verwendeten Koaxialleitungen soll bestimmt werden. Diese wurde auf zwei unterschiedlichen Wegen gemessen:

1. Die elektrische Länge der Leitungen wurde gemessen (siehe Anhang F)
2. Die Phasenverschiebung wurde direkt gemessen

Beide Messungen wurden mit dem Network Analyzer Hewlett Packard 8753D durchgeführt. Messung 1: Die Phasenverschiebung wird aus der elektrischen Länge der Leitungen ermittelt. Die Wellenlänge  $\lambda$  bei 434 MHz beträgt 0,6912 m, mit einem Verkürzungsfaktor von 0,66 der Leitung ändert sich die Wellenlänge auf 0,4562. Mit der Gleichung

$$\text{Phasenverschiebung} = \frac{\text{el.Länge der Leitung}}{\text{Wellenlänge auf der Leitung}} \cdot 360^\circ \quad \text{Gleichung 5.8}$$

lässt sich die Phasenverschiebung bestimmen. Da die Länge der Leitung einem mehrfachen der Wellenlänge entspricht, muss  $x \cdot 360^\circ$  von der Phase abgezogen werden um die relative Phase zu bekommen. Der Adapter zum Verbinden von 2 Leitungen verursacht eine Phasenverschiebung von  $18,8^\circ$ . Deswegen wurde dieser ebenfalls gemessen und zur relativen Phasenverschiebung der Leitung addiert.

|           | Gemessene elektrische Länge in m | Gesamte Phasenverschiebung auf der Leitung | Relative Phasenverschiebung auf der Leitung | Relative Phasenverschiebung mit Adapter von N-Buchse auf N-Buchse |
|-----------|----------------------------------|--|---|---|
| Leitung 1 | 0,9851                           | $777,7^\circ$                              | $57,71^\circ$                               | $76,54^\circ$   |
| Leitung 2 | 0,982                            | $775,5^\circ$                              | $55,54^\circ$                               | $74,37^\circ$   |
| Leitung 3 | 0,940                            | $742,4^\circ$                              | $22,42^\circ$                               | $41,25^\circ$   |
| Leitung 4 | 0,9846                           | $777,3^\circ$                              | $57,28^\circ$                               | $76,11^\circ$   |

**Tabelle 6: Berechnung der relativen Phasenverschiebung auf den Messleitungen**

Zusätzlich wurden die Phasenverschiebungen auf den Leitungen direkt mit dem Network Analyzer gemessen. In Tabelle 7 wird die berechnete Phase mit der gemessenen verglichen.

|           | Berechnete Phasenverschiebung aus der el. Länge nach Tabelle 6 | Gemessene Phasenverschiebung | Dämpfung der Leitung |
|-----------|--|------------------------------|----------------------|
| Leitung 1 | $76,54^\circ$  | $75^\circ$                   | 0,34 dB              |
| Leitung 2 | $74,37^\circ$  | $75^\circ$                   | 0,35 dB              |
| Leitung 3 | $41,25^\circ$  | $41^\circ$                   | 0,51 dB              |
| Leitung 4 | $76,11^\circ$  | $77^\circ$                   | 0,36 dB              |

**Tabelle 7: Vergleich der gemessenen mit der errechneten Phasenverschiebung**

Die Berechnung stimmt relativ gut mit den Messwerten überein.

### 5.2.1.4 Ausmessen der Ausziehleitung

Die Ausziehleitung wird in den Messungen dazu verwendet, um eine änderbare Phasenverschiebung der Speiseströme der Antennen zu erzeugen.

Die Ausziehleitung hat eine Anzeige von 0 bis 20 in einer unbenannten Einheit. Es ist anzunehmen, dass es sich dabei um die Verlängerung der Leitung in Zentimeter handelt, wie am Ende dieser Messungen erläutert wird.

Die Länge der Ausziehleitung im kürzesten Zustand beträgt ca. 1,1 m. Die Frequenz bei der Messung beträgt 434 MHz. Da sich in der Ausziehleitung Luft befindet, braucht kein Verkürzungsfaktor verwendet zu werden. Die Wellenlänge in der Leitung beträgt daher 0,691 m.

Mit der Gleichung 5.8 kann wieder die Phase errechnet werden.

$$\mathbf{Phasenverschiebung} = \frac{\mathbf{el.Länge\ der\ Leitung}}{\mathbf{Wellenlänge}} \cdot \mathbf{360^\circ} \quad \mathbf{Gleichung\ 5.8}$$

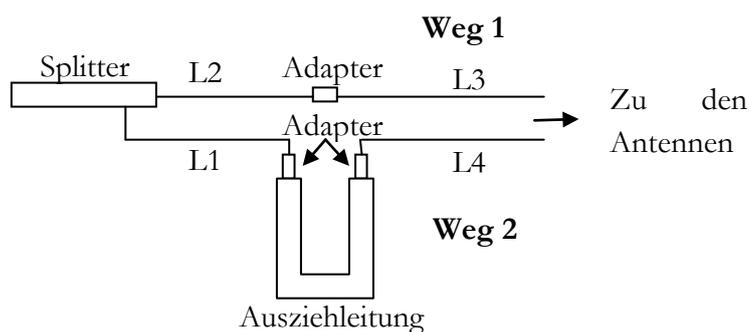
| Anzeige der Ausziehleitung | Gemessene Phasenverschiebung gegenüber eine Messung ohne Ausziehleitung | Berechnete Phasenverschiebung | $\Delta$ der gemessenen Phasenverschiebung gegenüber der Anzeige 0 | $\Delta$ der errechneten Phasenverschiebung gegenüber der Anzeige 0 |
|----------------------------|---|-------------------------------|--|---|
| 0                          | 212,5°  | 212,9                         | 0°   | 0°  |
| 5                          | 238,9°  | 238,9                         | 26,4   | 26,04°  |
| 10                         | 265°  | 265                           | 52,5   | 52,08°  |
| 15                         | 290°  | 291                           | 77,5   | 78,12°  |
| 20                         | 317°  | 317,1                         | 104,5°   | 104,2°  |

**Tabelle 8: Phasenverschiebung der Ausziehleitung**

Die Übereinstimmung ist sehr gut. Die Vermutung, dass es sich bei der Anzeige um Zentimeter handelt, hat sich damit bestätigt.

### 5.2.1.5 Phase des gesamten Messaufbaus ohne Antennen

Die Messungen im Freifeld sollen sowohl mit phasengleichem als auch mit phasenverschobenen Speisestrom durchgeführt werden. Dafür muss der eine Leitungsweg die Ausziehleitung beinhalten. Es wird ein Plan für den Anschluss der Leitungen benötigt um die gesamte Phasenverschiebung für die Simulation zu berechnen.



**Abbildung 64: Anschlussplan für Messungen mit und ohne Phasenverschiebung**

Die beiden Leitungswege setzen sich folgendermaßen zusammen:

1. Splitter (gerader Ausgang), L2, Adapter und L3 ergeben rechnerisch zusammen eine Phasenverschiebung von  $37,7^\circ$ . Gemessen wurde eine Phasenverschiebung von  $40^\circ$ .
2. Splitter (abgewinkelter Ausgang), L1, Adapter, Ausziehleitung, Adapter und L4 ergeben rechnerisch zusammen eine Phasenverschiebung von  $30,6^\circ$ . Gemessen wurde eine Phasenverschiebung von  $31,2^\circ$ .

|                 |               |                             |
|-----------------|---------------|-----------------------------|
| Splitter gerade | $301^\circ$   | Relative Phasenverschiebung |
| L2              | $55,5^\circ$  |                             |
| Adapter         | $18,8^\circ$  |                             |
| L3              | $22,4^\circ$  |                             |
| Summe berechnet | $397,7^\circ$ | ► $37,7^\circ$              |
| Summe gemessen  | gemessen      | ► $40,0^\circ$              |

**Tabelle 9: Berechnung der Phasenverschiebung von Weg 1, gerader Splitterausgang**

|                      |               |                             |
|----------------------|---------------|-----------------------------|
| Splitter abgewinkelt | $281^\circ$   | Relative Phasenverschiebung |
| L1                   | $57,7^\circ$  |                             |
| Adapter              | $18,8^\circ$  |                             |
| Ausz. Leit.          | $317^\circ$   |                             |
| Adapter              | $18,8^\circ$  |                             |
| L4                   | $57,3^\circ$  |                             |
| Summe berechnet      | $750,6^\circ$ | ► $30,6^\circ$              |
| Summe gemessen       |               | ► $31,2^\circ$              |

**Tabelle 10: Berechnung der Phasenverschiebung von Weg 2, abgewinkelter Splitterausgang**

Es bleibt ein kleiner Phasenunterschied des Speisestromes der Antennen, der nicht mit den vorhandenen Komponenten ausgeglichen werden kann. Ein Phasenunterschied im Speisestrom von weniger als  $9^\circ$  ist für die Messungen akzeptabel. Dieser tritt als weiterer Punkt in der Liste der Messungenauigkeiten auf.

## 5.2.2 Durchführung des Tests

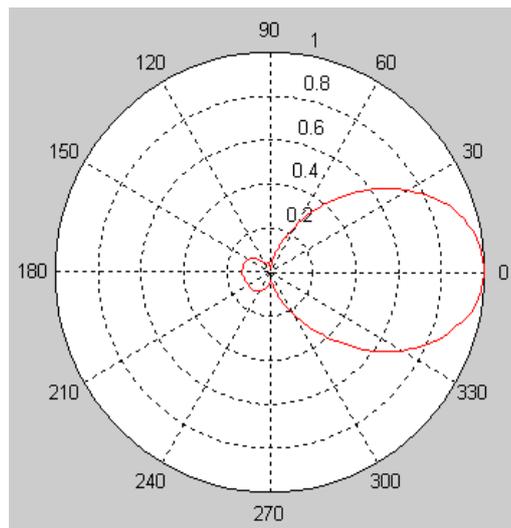
### 5.2.2.1 Messung Teil 1: Bestimmung des Einzel-Antennendiagramms (Primärdaten)

In einem ersten Schritt wird das Primärantennendiagramm der Quadantenne ausgemessen. Mit diesen Messwerten berechnet das Matlab-Programm später die Gruppenanordnungen. Für diese Berechnung werden Amplitude und Phase benötigt, die in möglichst kleiner Schrittweite gemessen werden.

Als Sendeantenne wird eine Antenne des Typs FT01 (Funkmesswagenantenne) verwendet. Als Empfangsantenne wird die Quadantenne verwendet, deren Antennendiagramm gesucht ist. Später wird mit dieser und einer baugleichen zweiten Antenne die Gruppencharakteristik bestimmt. Gesendet wird mit einer Frequenz von 434 MHz. Sende- und Empfangsantenne stehen 8 m voneinander entfernt. Durch diesen Abstand wird eine Messung im Fernfeld erreicht. Die Antennen sind in 1,5 m Höhe über dem Boden an zwei Stativen befestigt. Das Stativ der Empfangsantenne hat zusätzlich einen Rotor, auf dem die Antenne befestigt ist. Dieser Rotor kann über eine Steuereinheit gedreht werden. Das Display des Rotors zeigt die jeweilige Rotorstellung in Grad an. Die Anzeige des Rotorsteuergerätes ist relativ ungenau. Schrittweiten von  $1^\circ$  sind schwer einzustellen. Daher ist es nicht sinnvoll, Messwerte in einer kleineren Schrittweite als  $5^\circ$  aufzunehmen. Entsprechend werden die Amplitude und die Phase in  $5^\circ$  Schritten gemessen und in einer Datei gespeichert. Um zu überprüfen, ob beide Quadantennen identisch sind, wurde diese Messung mit beiden Quadantennen durchgeführt. Im Ergebnis sind beide Antennen weitgehend identisch. In dem Matlab-Programm wird davon ausgegangen, dass alle Antennenelemente gleich sind. Diese Voraussetzung wird erfüllt.

Die Messung wurde mit dem Network Analyzer 8714ET durchgeführt. Es wurde die Transmission (S21) zwischen Sende- und Empfangsantenne gemessen und Betrag und Phase gespeichert. Die Leitungen zu den Antennen wurden vor der Messung herauskalibriert.

Für eine einzelne Quadantenne ergibt sich folgendes Antennendiagramm:



**Abbildung 65: Antennendiagramm der Quadantenne**

Die Amplitude der Quadantenne wurde in  $5^\circ$  Schritten in dB gemessen, in lineare Werte umgerechnet und auf  $1^\circ$  Schritte interpoliert.

Für die Darstellung wurden die Messwerte auf das Maximum normiert.

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

Die Werte der gemessenen Phase liegen im Bereich von  $-180^\circ$  bis  $+180^\circ$  vor. Dieser Bereich ist durch den Networkanalyzer vorgegeben.

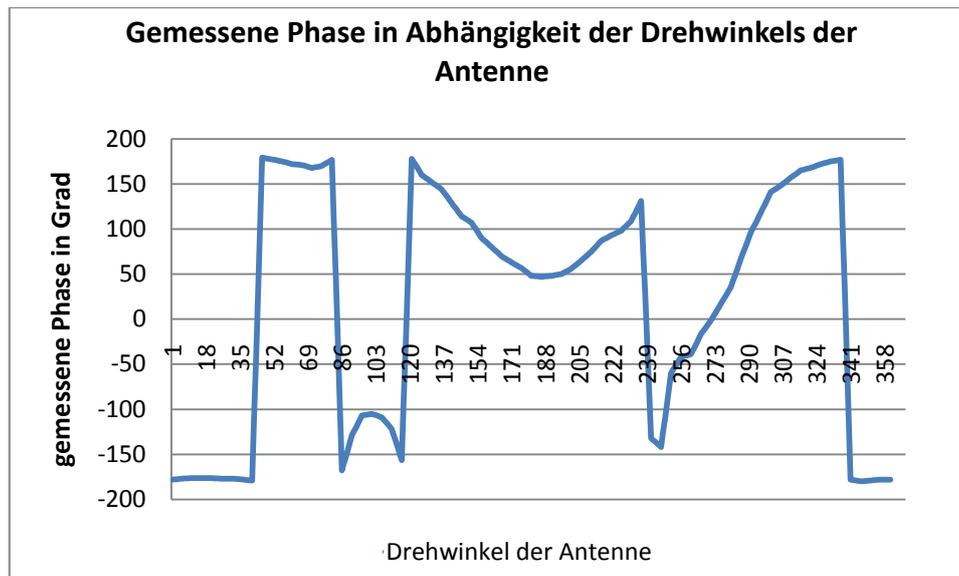


Abbildung 66: Darstellung der gemessenen Phase

x-Achse: Drehwinkel der Antenne von 0 bis  $2\pi$

y-Achse: Gemessene Phase

Quelle: Eigene Darstellung

Generell stellt die Verwendung dieser Werte kein Problem dar, doch bei der Interpolation der Phasenwerte können durch das Interpolieren der  $1^\circ$  Schritte aus den  $5^\circ$  Schritten Sprünge der Werte auftreten. Betragen zwei benachbarte Messwerte der Phase z.B.  $-170^\circ$  und  $+170^\circ$ , ergeben sich durch die Interpolation Fehler. Die Interpolationsfunktion weiß nicht, das  $+180^\circ$  und  $-180^\circ$  denselben Wert darstellen. Daher wird in die „falsche“ Richtung interpoliert. Die sich ergebenden falschen Zwischenwerte sind:  $-102^\circ$ ,  $-34^\circ$ ,  $34^\circ$ ,  $102^\circ$ . Eigentlich müsste sich für die vier Zwischenwerte aber  $-174^\circ$ ,  $-178^\circ$ ,  $+178^\circ$  und  $+174^\circ$  ergeben, vergl. auch Abbildung 66.

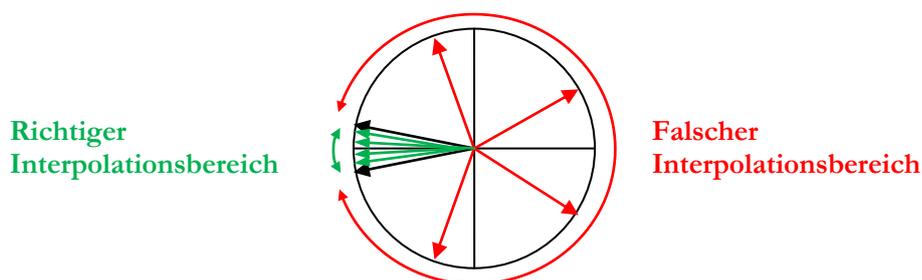


Abbildung 67: Interpolation der Phase

Um dieses Problem zu umgehen ist es zweckmäßig, die Phase in einem ersten Schritt in einen Bereich von  $0^\circ$  bis  $+360^\circ$  umzurechnen.

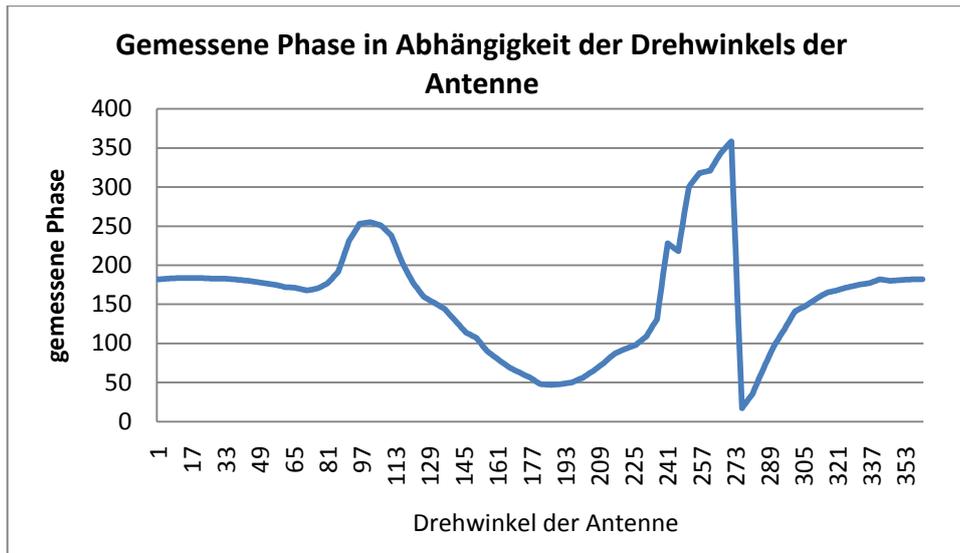


Abbildung 68: Darstellung der gemessenen Phase im positiven Bereich der Phase

x-Achse: Drehwinkel der Antenne von 0 bis  $2\pi$

y-Achse: Gemessene Phase

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Dabei können abhängig von den Messwerten weitere Sprünge auftreten, vergl. Abbildung 67, wenn wir hier der Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  zur Darstellung nicht ausreicht. Der Teil der Phase hinter dem Sprung wird durch Addition von  $360^\circ$  an den Verlauf der Kurve angepasst.

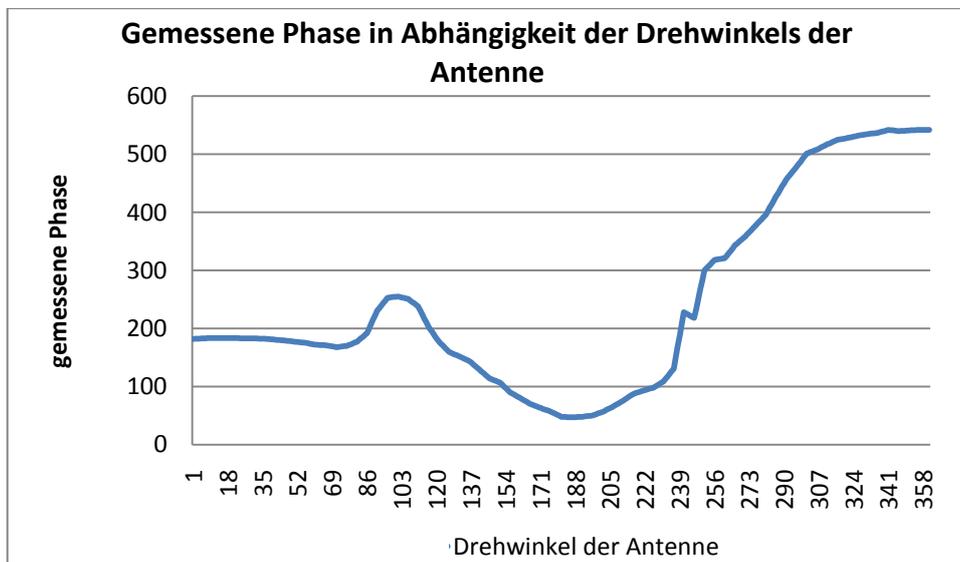


Abbildung 69: Darstellung der gemessenen Phase ohne Sprünge

x-Achse: Drehwinkel der Antenne von 0 bis  $2\pi$

y-Achse: Gemessene Phase

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Die in Abbildung 69 dargestellte Phase wird zusammen mit der Amplitude aus Abbildung 65 als Primärdaten verwendet.

### 5.2.2.2 Messung Teil 2: Gruppenantennen

Auf einem etwa 1 m langen Querträger auf dem Rotor können die zwei Quadantennen in verschiedenen Abständen befestigt werden. Die Antennen können an ihrer Montageposition in beliebige Richtungen gedreht werden. So kann eine große Anzahl von Anordnungen getestet werden.

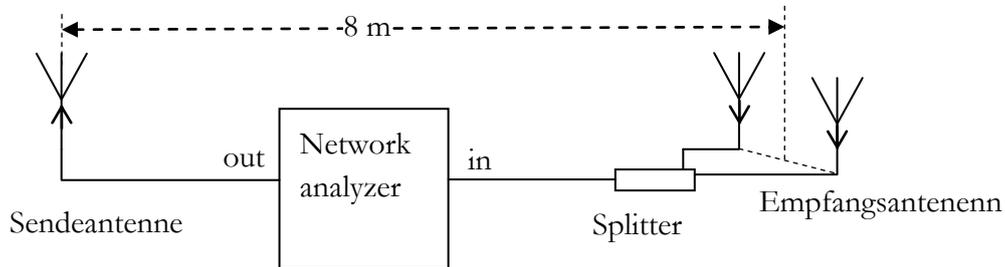


Abbildung 70: Messaufbau

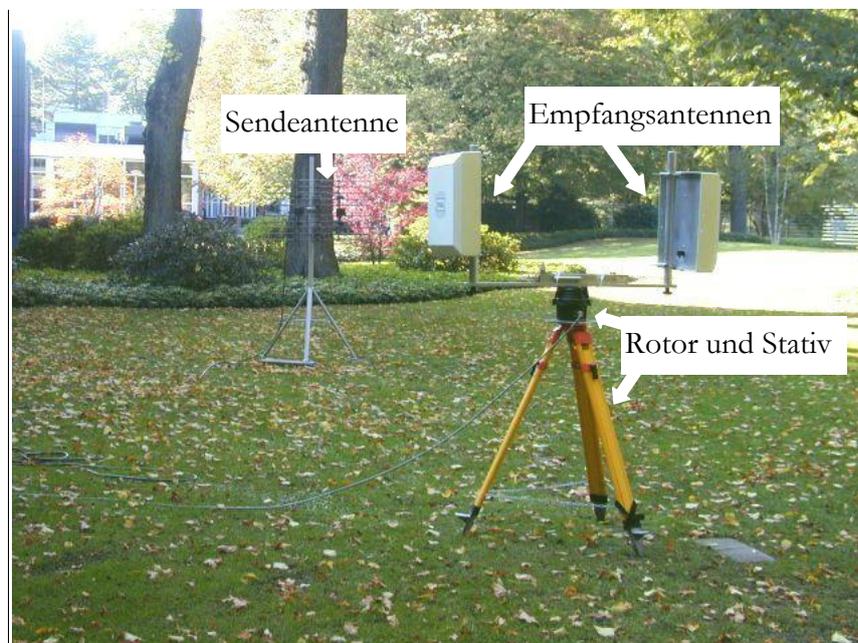


Abbildung 71: Messaufbau in der Praxis

Die beiden Quadantennen sind an den Enden des Querträgers befestigt.

In den Messreihen wird ausschließlich die Amplitude gemessen, da diese für eine Aussage über das Strahlungsdiagramm ausreicht.

Der NDR besitzt ein selbst geschriebenes Programm, mit dem die Messung der Amplitude weitgehend automatisiert wurde. Die Schrittweite und der Frequenzbereich muss gewählt werden und die Antennen müssen zu Beginn der Messung manuell auf einander ausgerichtet werden. Anschließend wird die Messung durchgeführt, wobei die Amplitudenwerte in eine Datei geschrieben. Diese in dB dargestellten Werte können nach der Umrechnung in lineare Werte mit den Ergebnissen aus der Berechnung verglichen werden.

### 5.2.3 Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungen des Matlab-Programms

In diesem Abschnitt werden sieben verschiedene Antennenanordnungen aufgebaut, gemessen und mit der Simulation des Matlab-Programms verglichen.

#### Versuchsaufbau 1:

- Antenne 1: Strahlrichtung =  $90^\circ$ , Elementrichtung =  $90^\circ$   
 Antenne 2: Strahlrichtung =  $270^\circ$ , Elementrichtung =  $270^\circ$

Die Antennen sind am äußersten Ende des Querträgers befestigt. Als Strahlrichtung wurde die Richtung des Querträgers gewählt, so dass die Antennen vom Rotor weg strahlen. Die Zählrichtung der Empfangsantennen beginnt mit  $0^\circ$  in Richtung der Sendeantenne.

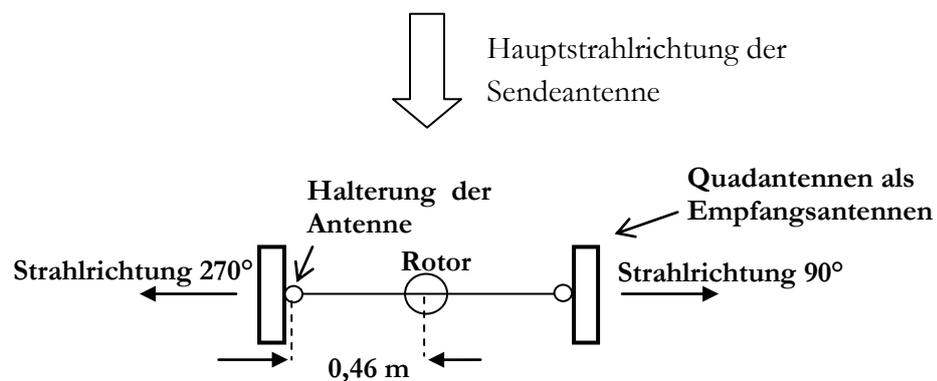


Abbildung 72: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung

Ansicht von oben

Elektrischer Aufbau der Empfangsantennen:

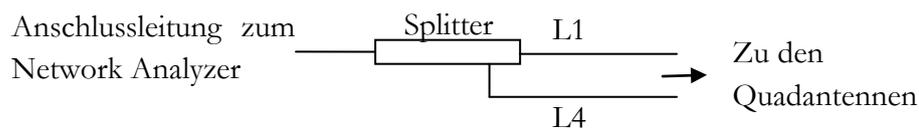


Abbildung 73: Elektrischer Aufbau

Leitung L1 und L4 sind annähernd gleich lang. Sie wurden ausgewählt, damit die Antennen mit einem phasengleichen Speisestrom versorgt werden.

Für diesen Aufbau soll die Messung mit der Simulation verglichen werden.

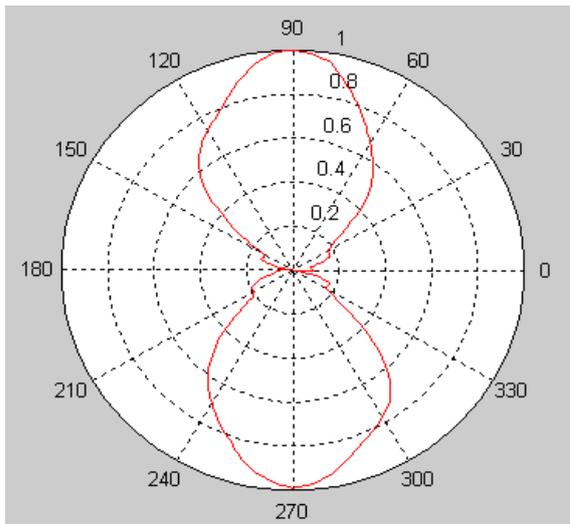


Abbildung 74: Messung des Antennendiagramms

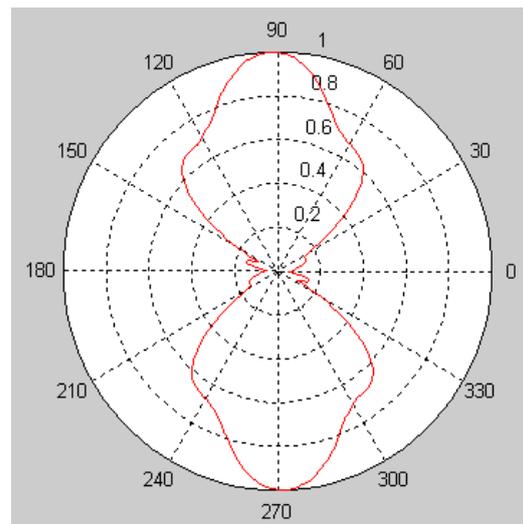


Abbildung 75: Berechnung des Antennendiagramms

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

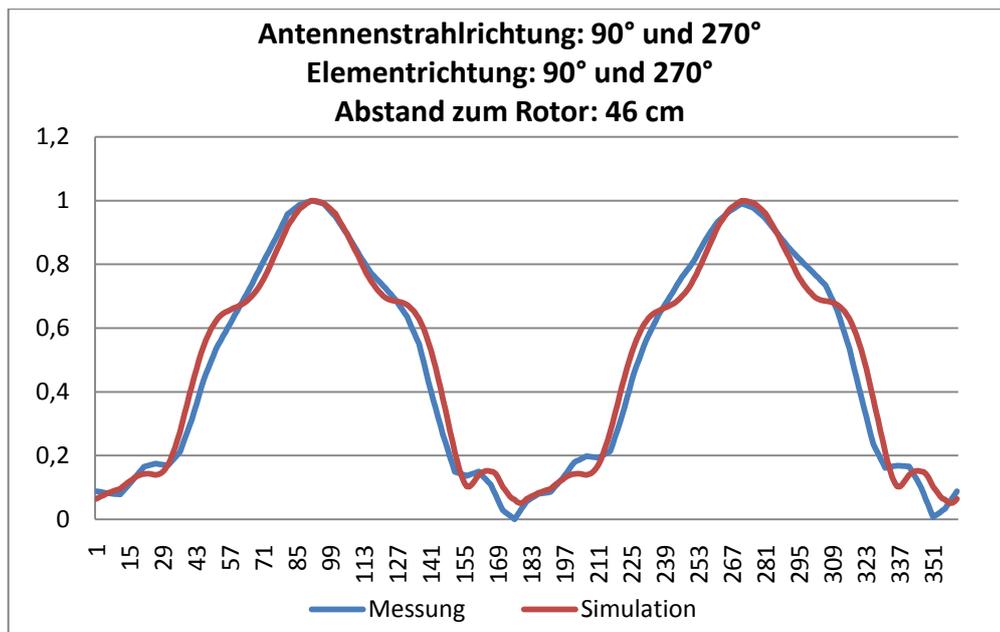


Abbildung 76: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Die durchschnittliche Abweichung zwischen Messung und Simulation beträgt 4,2 %. Die maximale Abweichung beträgt 15,1%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

**Versuchsaufbau 2:**

Antenne 1: Strahlrichtung =  $90^\circ$ , Elementrichtung =  $90^\circ$

Antenne 2: Strahlrichtung =  $270^\circ$ , Elementrichtung =  $270^\circ$

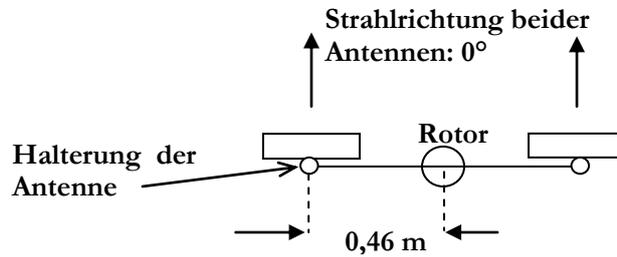


Abbildung 77: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung

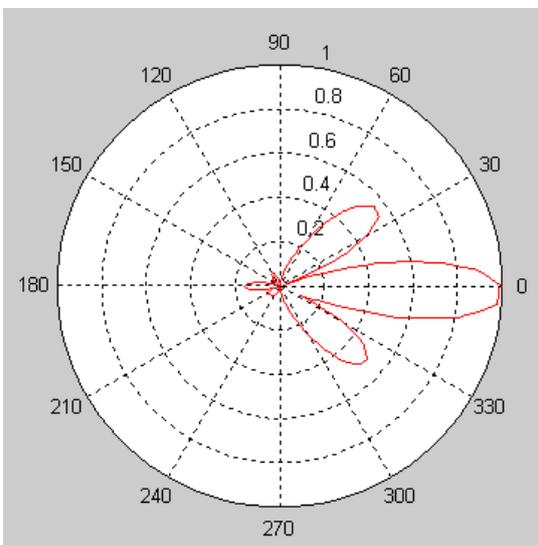


Abbildung 78: Messung des Antennendiagramm

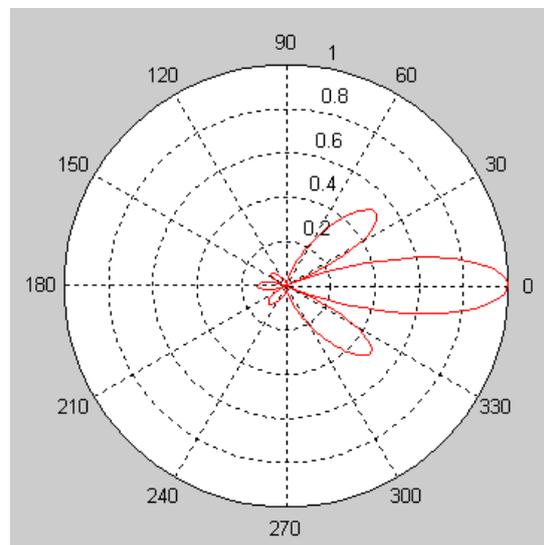


Abbildung 79: Berechnung des Antennendiagramms

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

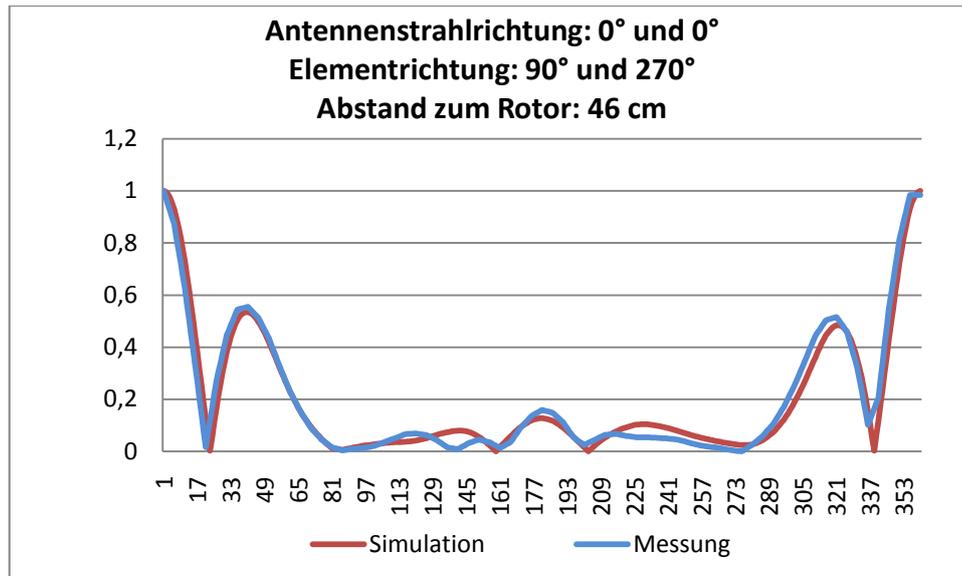


Abbildung 80: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Die durchschnittliche Abweichung beträgt 3,3%. Die maximale Abweichung beträgt 16%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

### Versuchsaufbau 3:

Antenne 1: Strahlrichtung = 0°, Elementrichtung = 90°

Antenne 2: Strahlrichtung = 0°, Elementrichtung = 270°

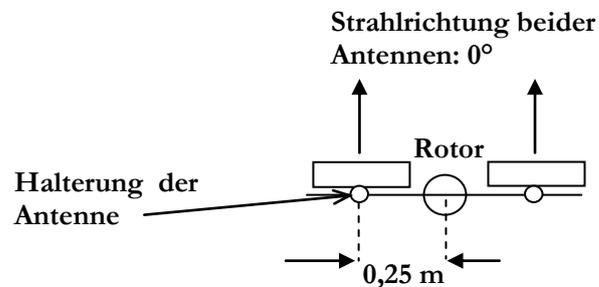


Abbildung 81: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung

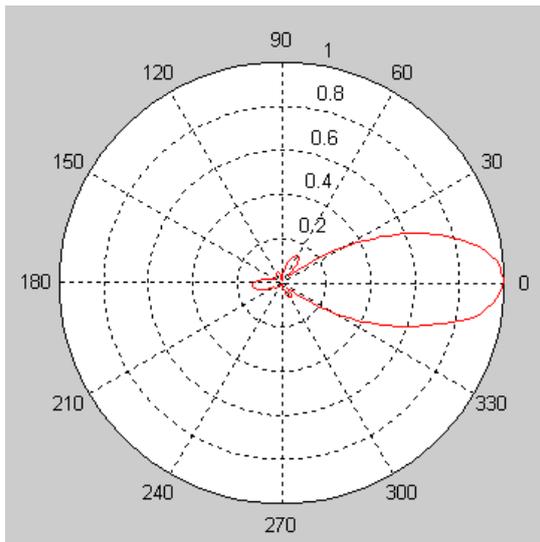


Abbildung 82: Messung des Antennendiagramms

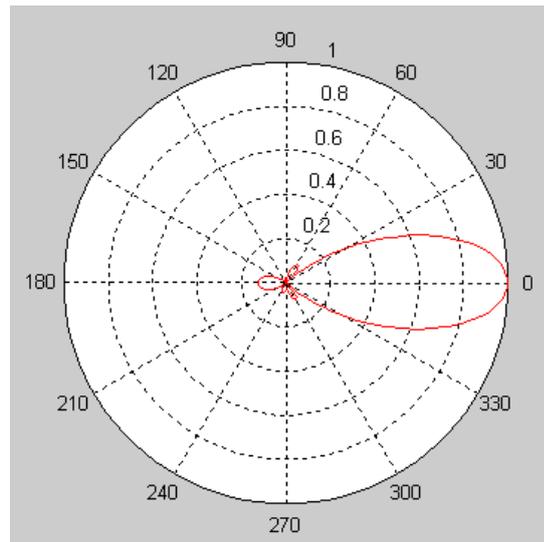


Abbildung 83: Berechnung des Antennendiagramms

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

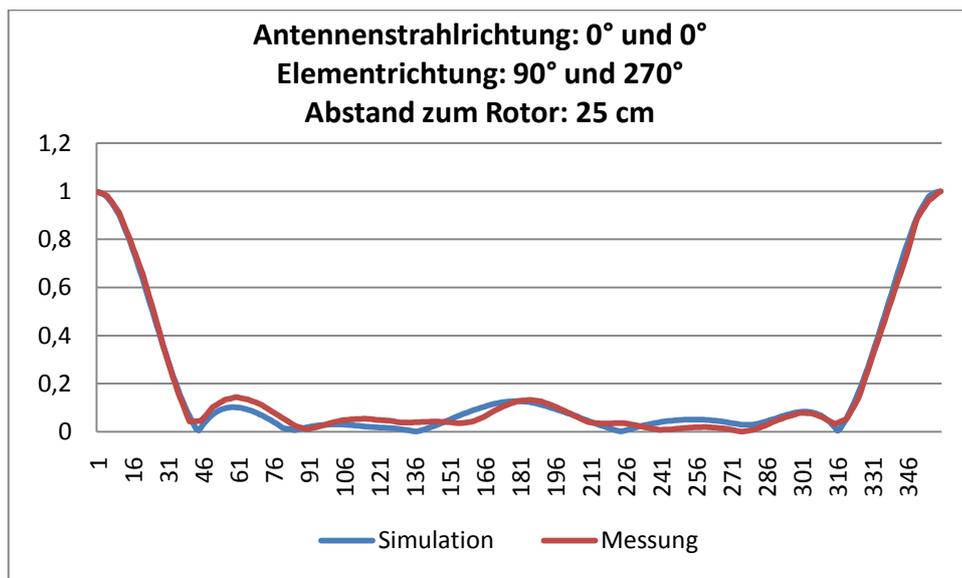


Abbildung 84: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Die durchschnittliche Abweichung beträgt 2,0%. Die maximale Abweichung beträgt 4,6%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

**Versuchsaufbau 4:**

Antenne 1: Strahlrichtung =  $0^\circ$ , Elementrichtung =  $90^\circ$

Antenne 2: Strahlrichtung =  $0^\circ$ , Elementrichtung =  $270^\circ$

Der Versuchsaufbau ist wie in Beispiel 3. Der Speisestrom der Antennen hat eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$ .

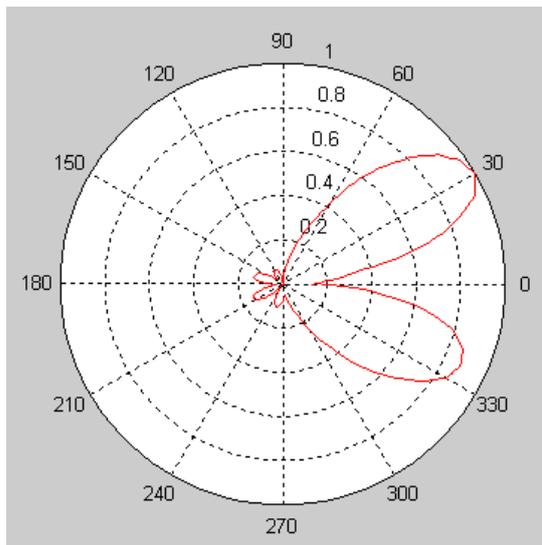


Abbildung 85: Messung des Antennendiagramms

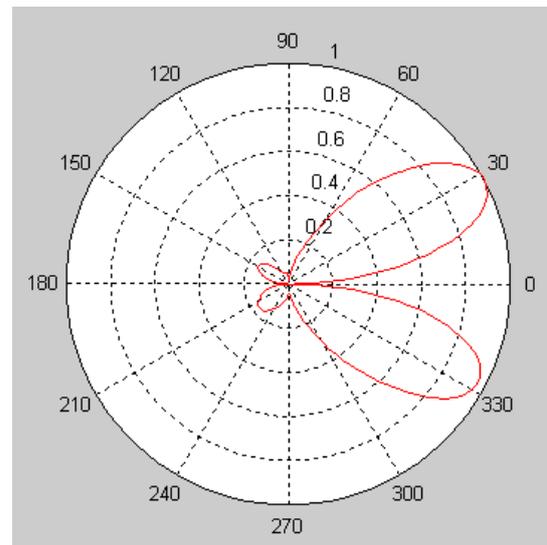


Abbildung 86: Berechnung des Antennendiagramms

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

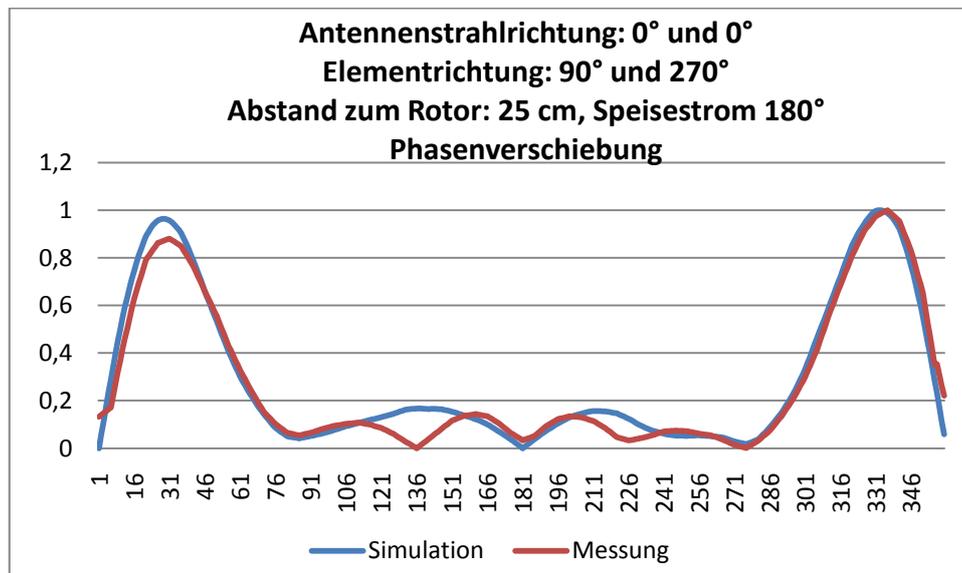


Abbildung 87: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Die durchschnittliche Abweichung beträgt 4,2%. Die maximale Abweichung beträgt 17,7%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

**Versuchsaufbau 5:**

Dieser Versuchsaufbau erhält durch Drehen des Trägers einen Vorversatz. In Versuchsaufbau 6 wird der Vorversatz durch eine Phasenverschiebung des Speisestromes aufgehoben. Die Phasenverschiebung des Speisestromes soll  $90^\circ$  betragen. Die Antennen haben einen Abstand von 0,92 m. Bei einer Wellenlänge von 0,691m entsprechen  $90^\circ$  einem Vorversatz von 0,173 m. Die Drehung des Querträgers zum Erreichen des Vorversatzes berechnet sich zu

$$\sin(\alpha) = \frac{0,173}{0,92}$$

$$\alpha = 10,8^\circ$$

Der Träger muss daher aus der Nullposition um  $10,8^\circ$  gedreht werden.

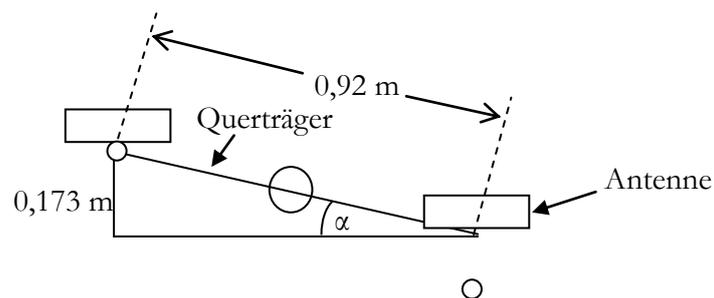


Abbildung 88: Skizze zur Berechnung des Drehwinkels

Antenne 1: Strahlrichtung =  $0^\circ$ , Elementrichtung =  $100^\circ$

Antenne 2: Strahlrichtung =  $0^\circ$ , Elementrichtung =  $280^\circ$

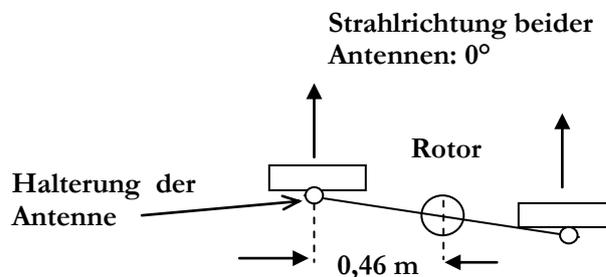


Abbildung 89: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung

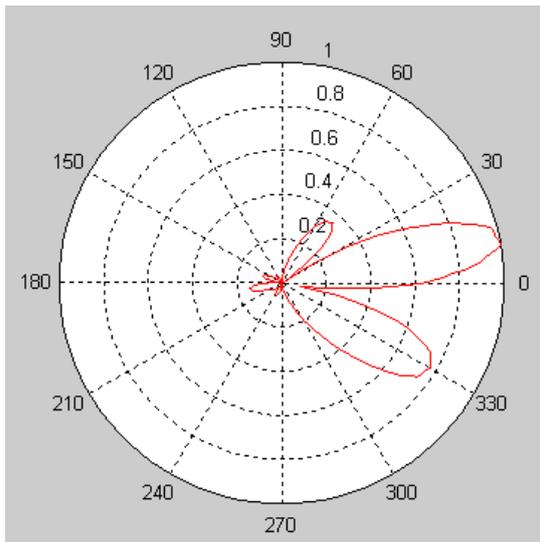


Abbildung 90: Messung des Antennendiagramms

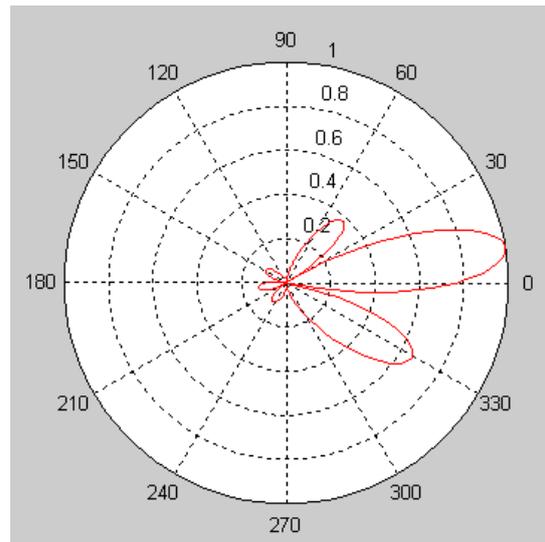


Abbildung 91: Berechnung des Antennendiagramms

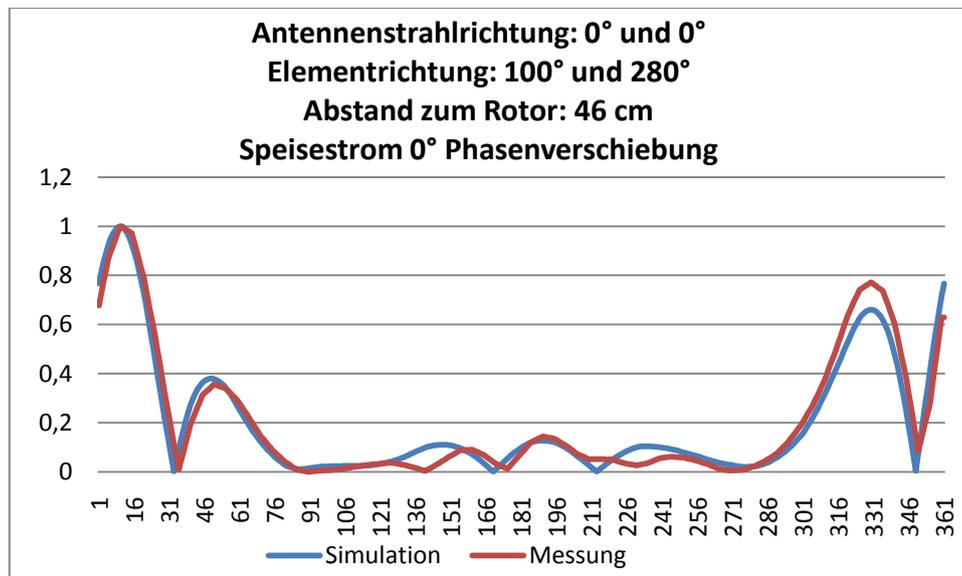


Abbildung 92: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

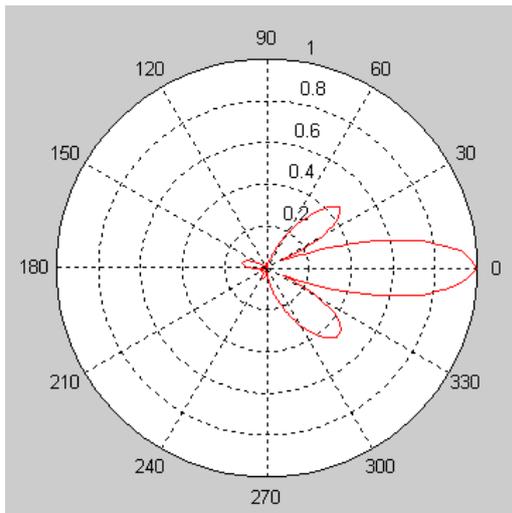
Die durchschnittliche Abweichung beträgt 4,2%. Die maximale Abweichung beträgt 13,9%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

**Versuchsaufbau 6:**

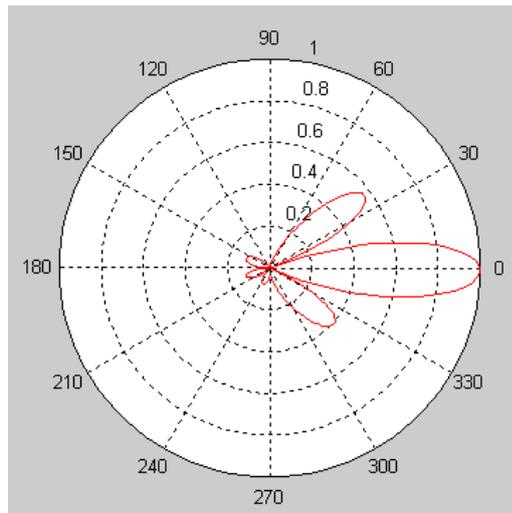
Dieser Versuchsaufbau erhält durch Drehen des Trägers um  $10,8^\circ$  einen Vorversatz. Durch eine Phasenverschiebung des Speisestromes von  $90^\circ$  wird die Wirkung des Vorversatzes aufgehoben.

1. Strahlrichtung =  $0^\circ$ , Elementrichtung =  $100^\circ$
2. Strahlrichtung =  $0^\circ$ , Elementrichtung =  $280^\circ$

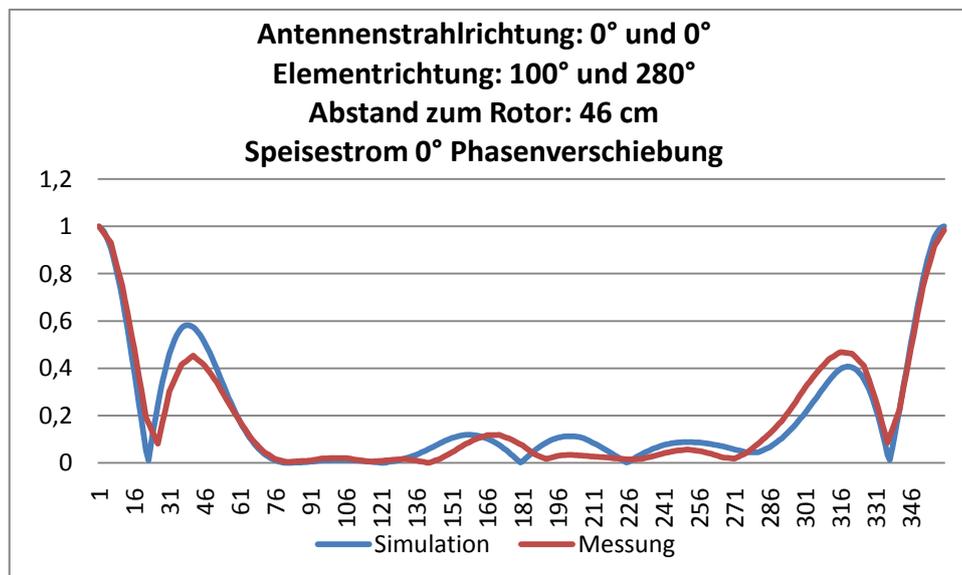
Der Versuchsaufbau entspricht dem von Versuchsaufbau 5.



**Abbildung 93: Messung des Antennendiagramms**



**Abbildung 94: Berechnung des Antennendiagramms**



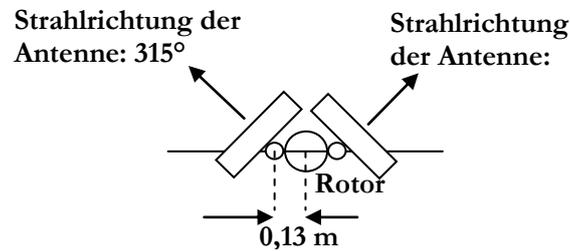
**Abbildung 95: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau**

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

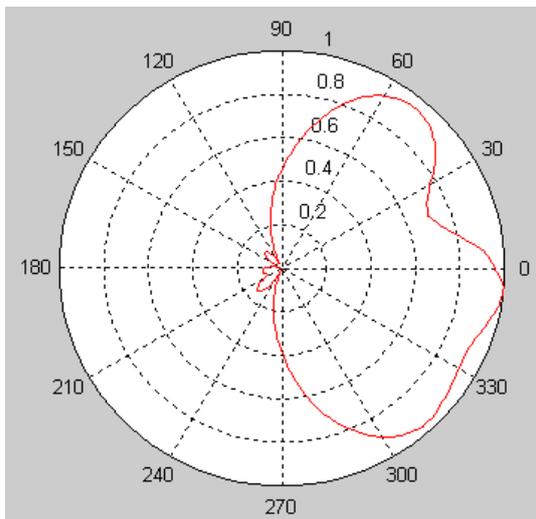
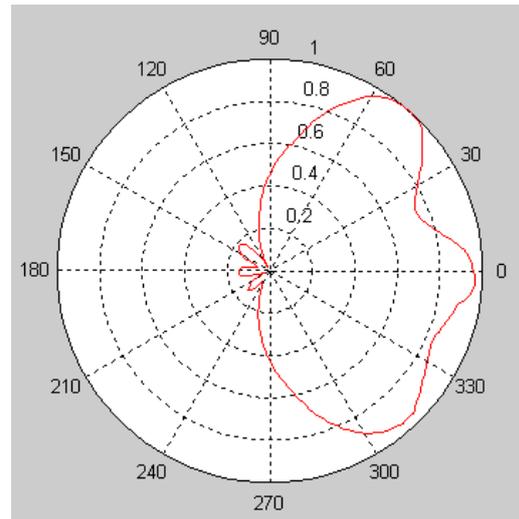
Die durchschnittliche Abweichung beträgt 4,5%. Die maximale Abweichung beträgt 17,2%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

**Versuchsaufbau 7:**

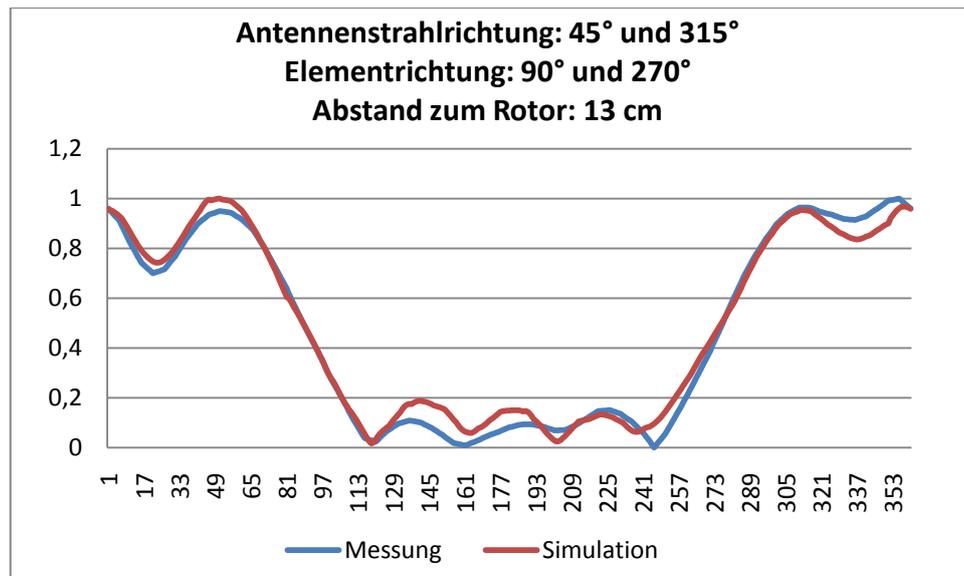
1. Strahlrichtung =  $45^\circ$ , Elementrichtung =  $90^\circ$
2. Strahlrichtung =  $315^\circ$ , Elementrichtung =  $270^\circ$

**Abbildung 96: Beispiel für den Aufbau einer Gruppenantennen-Messung**

Die Antennen sind bei diesem Versuchsaufbau sehr eng zusammen. Es treten Strahlungskopplungen zwischen den Antennen auf. Daher wurden für die Matlabsimulation Primärdaten verwendet, die mit der gleichen Antennenanordnung aufgezeichnet wurden.

**Abbildung 97: Messung des Antennendiagramms****Abbildung 98: Berechnung des Antennendiagramms**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab



**Abbildung 99: Vergleich der Amplituden (linear) aus dem vorangehenden Beispielaufbau**

Quelle: Eigene Darstellung mit Excel

Die durchschnittliche Abweichung beträgt 3,7%. Die maximale Abweichung beträgt 11%. Nach der Definition der Kriterien in Kapitel 5 ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

### Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse von Test 3 „Verifizierung des Matlab-Programms durch Messungen im Freifeld“

Insgesamt ergibt sich bei dem Vergleich zwischen der Messung des Antennendiagrammes der Gruppenanordnung und der Simulation mit dem Matlab-Programm eine gute Übereinstimmung. Hierbei müssen die Messungenauigkeiten und Fehlerquellen berücksichtigt werden. Da es sich um Freifeldmessungen handelt, können folgende Fehler auftreten:

- Reflexionen durch nahe Gebäude, Boden und Bäume. Durch Ausrichten der Hauptstrahlrichtung der Antennen parallel zum Gebäude und durch einen möglichst großen Abstand sind die Reflexionen auf einen kleinen Wert beschränkt worden. Während der Messung befand sich keine Person in der Nähe des Messaufbaus.
- Trotz der Verwendung von mechanischen Ausrichtwerkzeugen können geringfügige Ausrichtfehler der Antennen auftreten. Dieser Fehler wirkt sich nur begrenzt auf das Antennendiagramm aus.
- Sender mit derselben Frequenz wie die im Versuch verwendete. Die Messung des Grundpegels ergab, dass keine Fremdsender mit dieser Frequenz in der Nähe vorhanden sind. Der Abstand des Pegels der Hauptkeule zum Grundrauschen betrug mehr als 40 dB.

Es ist daraus zu schließen, dass die Einflüsse der oben beschriebenen Fehlerquellen gering sind und dass daher der Vergleich zwischen Simulation und Messung zulässig ist.

In den Winkelbereichen der Hauptkeule mit großer Amplitude stimmen Messung und Simulation gut überein. Die rückwärts gerichteten Nebenzipfel sind in Anzahl und Lage teilweise unterschiedlich. Diese Bereiche des Diagramms sind in der Praxis weniger kritisch als die Hauptkeulen, da dort nur ein Bruchteil der Leistung abgestrahlt wird.

Es wurden verschiedene Gruppenanordnungen der Antennen gewählt, die verschiedene Komponenten des Matlab-Programms testen. Dieses sind zum Beispiel der veränderte Abstand zur Mitte des Aufbaus, eine Phasenverschiebung der Speiseströme und der Vorversatz.

Am Anfang des 5. Kapitels wurde das Kriterium für die Begutachtung des Programms auf maximal 5% Abweichung zwischen Simulation und Messung festgelegt. In allen Tests ist die mittlere Abweichung kleiner als 5%. In den entscheidenden Bereichen der Hautkeulen ist die Abweichung meist deutlich geringer.

Dank der guten Übereinstimmung der Simulation mit den Messergebnissen wurde gezeigt, dass das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Matlab-Programm korrekt arbeitet.

## 6 Abschlussbetrachtung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Rechenwege des Matlab-Programms gegeben und die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und beurteilt.

Außerdem werden Vorschläge zur weiteren Entwicklung des Programms gemacht.

### 6.1 Überblick über die Rechenwege des Matlab-Programms

In diesem Abschnitt werden die Rechenwege des Matlab-Programms zusammengefasst und die notwendigen Informationen zum Berechnen eines Antennendiagramms aufgelistet. Die oberen beiden Rechenwege waren bereits im QuickBASIC-Programm nutzbar, die unteren beiden Rechenwege sind in dem Matlab-Programm hinzugekommen.

- **Rechnen mit den Näherungsgleichungen der Entwickler des QuickBasic-Programms**

Notwendige Informationen zum Berechnen der Antennendiagramme:

1. Geometrische Anordnung der Antennen, Frequenz, Phasenlage
2. Antennentyp
3. wünschenswert: Amplitude der Antenne in  $10^\circ$  Schritten von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$

- **Rechnen mit den Fourier-Koeffizienten**

Notwendige Informationen zum Berechnen der Antennendiagramme:

1. Geometrische Anordnung der Antennen, Frequenz, Phasenlage
2. Amplitude der Einzelantenne in  $10^\circ$  Schritten

- **Rechnen mit den Primärdaten in  $10^\circ$  Schritten**

Notwendige Informationen zum Berechnen der Antennendiagramme:

1. Geometrische Anordnung der Antennen, Frequenz, Phasenlage
2. Phase der Einzelantenne in  $10^\circ$  Schritten
3. Amplitude der Einzelantenne in  $10^\circ$  Schritten

- **Rechnen mit den Primärdaten in  $1^\circ$  Schritten**

Notwendige Informationen zum Berechnen der Antennendiagramme:

1. Geometrische Anordnung der Antennen, Frequenz, Phasenlage
2. Phase der Einzelantenne in  $1^\circ$  Schritten
3. Amplitude der Einzelantenne in  $1^\circ$  Schritten

## 6.2 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Das Ziel der Aufgabenstellung, die Nachbildung und Erweiterung des QuickBASIC-Programms, wurde erreicht. Die in Kapitel 5 definierten Qualitätsmerkmale wurden in den Tests eingehalten. Besonders hervorzuheben ist die Beantwortung der folgenden Kernfragestellungen:

### **Welches sind die Verbesserungen des Matlab-Programms gegenüber dem QuickBASIC-Programm?**

Das neue Matlab-Programm kann erstmalig Amplitude und Phase direkt aus den Primärdaten verwenden. Ein Umweg über die Fourier-Koeffizienten bei der Amplitude ist nicht mehr erforderlich. Die gemessene Phase wird erstmals in die Berechnung einbezogen. Dadurch können die seit einiger Zeit von den Antennenherstellern gelieferten Primärdatensätze mit Amplitude und Phase im Matlab-Programm verwendet werden.

### **Wie gut sind die Näherungsgleichungen der Entwickler des QuickBASIC-Programms zur Berechnung von Antennendiagrammen ohne Primärdaten?**

Die Näherungsgleichungen für Dipol, Antennenfeld und Yagi-Antenne geben das reale Antennendiagramm gut wieder. Allerdings ist die Anwendung dieser Gleichungen mit der Einbeziehung des Horizontalkorrekturfaktor verbunden (siehe Kapitel 3.4.2). Dieser sollte je nach Anordnung der Antennen-Elemente individuell angepasst werden. Dieses bedarf einiger Erfahrung oder den Gebrauch der Vergleichstabelle aus Anhang E zur Bestimmung des Horizontalkorrekturfaktors. Für die Anwendung dieser Tabelle werden Primärdaten zum Vergleich benötigt. Liegen diese Primärdaten vor, könnte jedoch gleich ein verlässlicherer Rechenweg gewählt werden. Der Rechenweg unter Verwendung der Fourier-Koeffizienten bei unbekannter Phase ist der Rechenweg mit Näherungsgleichungen vorzuziehen.

Bei der Verwendung der Näherungsgleichungen ist wegen der hohen Fehlerhäufigkeit des Verfahrens Vorsicht geboten. Dieser Rechenweg zur Bestimmung von Antennendiagrammen sollte deshalb nur dann verwendet werden, wenn gar keine Primärdaten vorliegen.

### **Welcher Rechenweg ist besser: Die Verwendung von Fourier-Koeffizienten oder die Verwendung von Primärdaten?**

Wird der Rechenweg des QuickBASIC-Programms mit den Fourier-Koeffizienten gewählt, wird die Phase der Antennenelemente am Aufpunkt P ausschließlich aus der Angabe des Abstandes zwischen Quellpunkt und Bezugspunkt berechnet. Das würde auch geschehen, wenn Messwerte der Phase vorliegen, da diese nicht verwendet werden können. Vergleichstests mit dem Matlab-Programm haben gezeigt, dass sich bei den beiden Rechenwegen unterschiedliche Antennendiagramme ergeben können (siehe Kapitel 5.1.2). Die Antennendiagramme berechnet aus Primärdaten inklusiv der Phase haben eine größere Übereinstimmung mit der Realität.

Die beiden Rechenwege a) über die Fourier-Koeffizienten und b) die direkt verwendete Primärdaten, sind im neuen Matlab-Programm verwendbar. Liegen Primärdaten als Phase und Amplitude als vor, sollten diese verwendet werden.

**Welcher Interpolationsweg liefert die besten Ergebnisse?**

Liegen Primärdaten in grober Schrittweite von z.B.  $10^\circ$  vor, können die Zwischenwerte auf unterschiedlichen Wegen interpoliert werden (siehe Kapitel 4.2). Es hat sich gezeigt, dass die Spline-Interpolation und die Hermite-Interpolation trotz ihrer besseren Annäherung an den realen Verlauf des Antennendiagramms für die Interpolation kaum besser als die lineare Interpolation sind. Die auftretenden Unterschiede zwischen den aus interpolierten Daten gewonnenen Antennendiagramm sind nur schwer zu erkennen. Könnte keine in Matlab integrierte Interpolationsfunktion verwendet werden, wäre der Aufwand eine Spline-Interpolation selber zu erstellen, nicht gerechtfertigt.

**Wie gut sind die Ergebnisse des Matlab-Programms im Vergleich mit Freifeld-Messungen?**

Eine komplette theoretische Untersuchung des Matlab-Programms anhand von Realen Sendeantennen wurde nicht erreicht, da für viele Antennen Messergebnisse aus der Praxis fehlen. Zum Ausgleich wurden Freifeld-Messungen durchgeführt. Der Vergleich zwischen den Messungen im Freifeld und der Simulation mit Matlab ergibt eine gute Übereinstimmung von unter 5% mittlerer Abweichung. Daraus lässt sich schließen, dass die Simulation des Matlab-Programms gute Werte liefert.

### 6.3 Ausblick und Weiterentwicklung

Diese Bachelorarbeit behandelt sich im Wesentlichen mit der Analyse des QuickBASIC-Programms, der Nachbildung in Matlab und einer wesentlichen Erweiterung für neue Primärdaten der Antennenhersteller. Eine Benutzeroberfläche für das Matlab-Programm ist nicht Bestandteil der Arbeit. Zur Benutzung des Programms ist die Programmierung einer Software mit Benutzeroberfläche erforderlich.

Auch vorstellbar wäre eine Erweiterung des Antennenprogramms mit Berechnungen des Gewinns oder der Feldstärke in unterschiedlichen Entfernungen.

## 7 Quellen

### Bücher, Zeitschriften und Skripte

- [Breitkopf, 2008] Breitkopf, Klaus: Rundfunktechnische Mitteilungen. 1979, Heft 6
- [Ings, 2008] Ings, Simon: Das Auge. Hoffman und Campe, 2008
- [Kark, 2004] Kark, Klaus: Antennen und Strahlungsfelder. vieweg Studium Technik, 2004
- [Rothammel, Krischke, 2002] Rothammel, Karl / Krischke, Alois: Rothammels Antennenbuch. DARC, 2002
- [Schröder, 1965] Elektrische Nachrichtentechnik Band 1- Schröder, Heinrich, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, 1965
- [Stirner, 1984] Stirner, Edmund: Antennen Band 1. Hüthing, 1984
- [Stirner, 1986] Stirner, Edmund: Antennen Band 2. Hüthing, 1986
- [Unger, 1994] Unger, Hans-Georg: Hochfrequenztechnik in Funk und Radar. Teubner Studienskripte, 1994
- [Wiesbeck, 1965] Wiesbeck, Werner: Antennen und Antennensysteme. Skriptum zur Vorlesung 1965

### Internetseiten

- [Hanke-Bourgeois / Schappel / Gebauer, 2004] Prof. Dr. Hanke-Bourgeois, Martin / Dipl.-Math. Schappel, Birgit / Dipl.-Math. Gebauer, Bastian: Numerik und Mathematik, Spline-Interpolation, Uni Maiz, 2004 - URL [www.numerik.mathematik.uni-maiz.de/didaktikseminare/Gruppe3/index.html](http://www.numerik.mathematik.uni-maiz.de/didaktikseminare/Gruppe3/index.html), Stand: 01.12.2009
- [Kathrein Katalog] Kathrein Katalog, Superturnstile-Antenne - URL <http://www.sitel.it/CATALOGO20KATHREIN.pdf>, Stand: 01.12.2009
- [Kraft, 2008] Prof. Dr. -Ing. Kraft, K.H.: Unterlagen zur Lehrveranstaltung: Hochfrequenztechnik 2, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, 2008, - URL [http://public.rz.hfwolfenbuettel.de/~kraft/vl/hf2\\_u\\_w08k.pdf](http://public.rz.hfwolfenbuettel.de/~kraft/vl/hf2_u_w08k.pdf), Stand: 01.12.2009
- [WiMo] WiMo Antennen GmbH, Quadantenne - URL [http://www.wimo.de/framesetp\\_d.html](http://www.wimo.de/framesetp_d.html), Stand: 01.12.2009
- [WISI] WISI Communications GmbH Co. KG, FT01 Funkmesswagenantenne - URL <http://www.wisi.de>, Stand: 03.12.2009
- [Zwirello, 2009] Zwirello, Lukasz: Untersuchung linearer Antennen mit einem Netzwerkanalysator, Universität Karlsruhe, WS 2009/2010 - URL [http://www.ihe.kit.edu/img/studium/Versuch6\\_WS09\\_10.pdf?PHPSESSID=485e608a71230ffcca24cd3e7dcb2ae2](http://www.ihe.kit.edu/img/studium/Versuch6_WS09_10.pdf?PHPSESSID=485e608a71230ffcca24cd3e7dcb2ae2), Stand: 01.12.2009

## Anhang

### A Die Variablen des QuickBASIC-Programms

A = Amplitude

A(X, Y, 0) = Amplitude des Antennenelementes (meistens 1)

A(X, Y, 1) = Speisephase

A(X, Y, 2) = Strahlrichtung

A(X, Y, 2) = Strahlrichtung des Antennenelementes des Spalte X und der Zeile Y

A(X, Y, 3) = Neigungswinkel des Antennenelementes des Spalte X und der Zeile Y

A(X, Y, 4) = Elemententfernung

A(X, Y, 5) = Elementrichtung

A(X, Y, 6) = Vertikaler Abstand

A(X, Y, 7) = Konstante Phase

AH = Anfangswinkel horizontal

AV = Anfangswinkel vertikal

AW = Azimutwinkel

AX = Horizontaler Faktor für die Amplitude

B ( $\alpha$ ) entspricht der Differenz zwischen dem Azimutwinkel und der Strahlrichtung in Bogenmaß

BB = Betrag der Entfernung zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt

BB = Betrag des Abstandes Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt

C ( $\beta$ ) entspricht der Differenz zwischen Erhebungswinkel und dem Neigungswinkel in Bogenmaß

C1 =  $\pi/180$

D ist eine Hilfsvariable zur Berechnung von VK

D(0) nicht belegt

D(1) = Vertikaler Nullwinkel

D(2) = Korrektur Horizontal

D(3) = Gewinn je Element in dB

D(4) = Rückwärtskorrektur

D(5) = Dipolebenen pro Element

D(6) = Nennfrequenz

D(7) = Dipolabstand in Metern

D(8) = Elementart (Antennenfeld, Yagi, Dipol, Super T Stile, Verwendung der Fourier-Koeffizienten)

D(9) = Entfernung Quellpunkt bis Bezugspunkt der Antenne (Strecke)

EH = Endwinkel horizontal

ENTFJ = „Entfernung imaginär“ zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt

ENTFR = „Entfernung real“ zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt

EV = Endwinkel vertikal

EW = Erhebungswinkel

FM = Rechenfrequenz

In GOSUB 9200 wird der Real- und Imaginärteil in Betrag und Phase umgerechnet

JJ = Entfernung imaginär

P = Phase

P0 ist =  $\pi$  wenn Theta größer 90° ist

Q = Imaginärteil (Aufsummierter Imaginärteil von allen Antennenelementen von einem Winkel)

R = Realteil (Aufsummierter Realteil von allen Antennenelementen von einem Winkel)

RR = Entfernung real

SH = Schrittweite horizontal

SV = Schrittweite vertikal

UF entspricht der Wellenzahl kz

VK = Vertikaler Faktor für die Amplitude

WW = Winkel zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt

WW = Winkel zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt

X = Zeilenanzahl der Antennenelemente

XA = Erste zu berechnende Spalte

XE = Letzte zu berechnende Spalte

Y = Spaltenanzahl der Antennenelemente

YA = Erste zu berechnende Spalte

YE = Letzte zu berechnende Spalte

## B Analyse des Quellcodes des Quick-Basic Programms

In diesem Abschnitt wird das Quick-Basic Programm zeilenweise beschrieben.

Die Erklärungen der Variablen sind im Anhang A.

**1881 FOR EW = AV TO EV + SV / 2 STEP SV**

**1890 FOR AW = AH TO EH + SH / 2 STEP SH: R = 0: Q = 0**

Zeile 1881 ist der Schleifenkopf für den Durchlauf des Erhebungswinkels, Zeile 1890 ist der Schleifenkopf für den Durchlauf des Azimutwinkels. Durch die Auswahl des jeweiligen Anfangs- und Endwinkels kann der Benutzer den für ihn relevanten Teil des Antennendiagramms auswählen und die Schrittweite für die Berechnung festlegen.

Real- und Imaginärteil werden am Anfang des Durchlaufes von jedem Winkel auf Null gesetzt.

SV/2 kann gegen SV ausgetauscht werden. SV/2 wird verwendet um bei der Berechnung des Gewinns eine ungerade Schrittzahl zu erzeugen. Dies ist sinnvoll, um bei 90° einen Wert zu erhalten. Bei einem Anfangswinkel von 0° und einem Endwinkel von 180° und einer geraden Anzahl von Schritten größer 1° wird der Wert für 90° nicht berechnet.

**1900 FOR Y = YA TO YE: FOR X = XA TO XE: GOSUB 20020**

In Zeile 1900 beginnen die Schleifendurchläufe durch die Zeilen und Spalten der Antennenelemente. Der Benutzer kann mit der ersten und letzten Zeile bzw. Spalte den für ihn interessanten Teil der Gesamtantenne auswählen.

GOSUB 20020 springt in die Berechnung der einzelnen Antennenelemente.

**1910 R = R + A \* COS(P): Q = Q + A \* SIN(P): NEXT X, Y**

In Zeile 1910 werden die Real- und Imaginärteile der einzelnen Antennenelemente aufaddiert. Die Real- und Imaginärteile werden aus der Amplitude und der Phase berechnet.

Danach wird dieselbe Rechnung mit der nächsten Spalte bzw. Zeile durchgeführt.

**1960 RR = R: JJ = Q: GOSUB 9200: A = BB: P = WW: IF A \* AZ > AA THEN AA = A \* AZ: VW = EW: HW = AW**

In GOSUB 9200 werden Real- und Imaginärteile in Phase und Betrag umgerechnet.

Vor dem Erreichen des beschriebenen Ausschnittes des Programms wird AZ auf 1 und AA auf 0 gesetzt.

Um am Ende eine Normierung auf das Maximum in Antennendiagramm durchführen zu können, muss der maximale Wert ermittelt werden. Dieses wird in der if-Abfrage durchgeführt. Anschließend wird der Erhebungswinkel und der Azimutwinkel unter einer anderen Variable gespeichert.

### Abschnitt zur Berechnung der einzelnen Antennenelemente:

**20020 UF = 1.200831 \* FM' \*\*\*\*\* RELATIVE AMPLITUDE+PHASE DES ELEMENTES \*\*\*\*\***

$$UF = \frac{360 f}{c} = \frac{2 \pi}{\lambda}$$

**20030 IF X > XA THEN ON Y(Y) GOTO 20212, 20230**

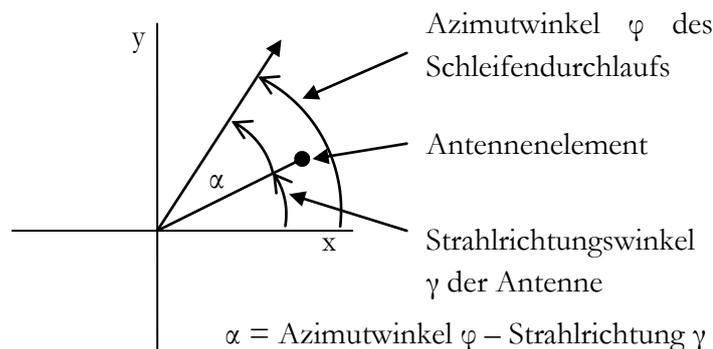
Es handelt sich nicht um den ersten Durchlauf der Spalte. Abhängig von der Antennenzeile wird nach Zeile 20212 oder 20230 gesprungen.

**20040 SW = SIN(C1 \* EW): CW = COS(C1 \* EW)**

Variablen zur Berechnung von z.B. den Phasendifferenzen aus vertikalen und horizontalen Laufzeitdifferenzen.

**20100 B = C1 \* (AW - A(X, Y, 2)): C = C1 \* (EW - A(X, Y, 3) \* SGN(COS(B))): P0 = 0**

Hier wird der Winkel zwischen dem Winkel des Schleifendurchlaufes (Azimut- oder Erhebungswinkel) und dem Winkel durch die Montage der Antenne in Bogenmaß bestimmt.



**Abbildung 100: Berechnung des Winkels B bzw.  $\alpha$**

Beispielbild: Ermittlung des Winkels zwischen dem Azimutwinkel und der Strahlrichtung der Antenne

B entspricht  $\alpha$  aus der

Abbildung 100. B kann zwischen  $-360^\circ$  bis  $+360^\circ$  variieren, da der Azimutwinkel in der Schleife und die Strahlrichtung der Antenne Werte zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  annehmen können. Die Maxima von  $\alpha$  werden in Kapitel 3.3.3 behandelt.

C entspricht  $\beta$ . C kann zwischen  $-90^\circ$  bis  $+270^\circ$  variieren, da der Erhebungswinkel in der Schleife Werte zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  und der Neigungswinkel der Antenne Werte zwischen  $\pm 90^\circ$  annehmen können. Die Maxima von  $\beta$  werden in Kapitel 3.3.3 behandelt

Mit C1 wird der Winkel von Grad in Bogenmaß umgerechnet.

Bei negativem Voreichen von B dreht sich das Vorzeichen von C.

**20130 IF ABS(C) > PI THEN C = C - 2 \* PI \* SGN(C): GOTO 20130****20150 IF ABS(C) > PI / 2 THEN B = B + PI: C = PI - C: P0 = PI: GOTO 20130**

In Zeile 20130 bis 20180 des Quick-Basic Programms wird eine Umrechnung von B und C bzw.  $\alpha$  und  $\beta$  in einen anderen Winkelbereich vorgenommen.

**20130 IF ABS(C) > PI THEN C = C - 2 \* PI \* SGN(C): GOTO 20130****20150 IF ABS(C) > PI / 2 THEN B = B + PI: C = PI - C: P0 = PI: GOTO 20130****20180 IF ABS(B) > PI THEN B = B - 2 \* PI \* SGN(B): GOTO 20180**

Durch die Geometrie der Antennendiagramme wiederholen sich die Amplituden bei bestimmten Winkeln. Solange diese Geometrie gegeben ist, können rechnerische Vereinfachungen benutzt werden.

Das Quick-Basic Programm hatte in der Vergangenheit zur Berechnungsgrundlage nur Primärdaten in einem eingeschränkten Bereich z.B. für  $\alpha$  (B) und  $\beta$  (C) Amplituden von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$ . Daher bot es sich an, nur bestimmte Bereiche des Diagramms zu berechnen und die übrigen Amplituden aus der Geometrie zu ermitteln. Generell ist die Umrechnung in den anderen Winkelbereich nicht erforderlich und wurde deshalb nicht in das Matlab Programm übernommen. Bei nicht spiegelsymmetrischen Antennendiagrammen ist dieses Verfahren generell nicht möglich.

Dieses Verfahren wird sowohl bei C als auch bei B angewandt.

Der Bereich von C wird von  $-90^\circ$  bis  $+270^\circ$  auf  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$  verkleinert.

Beispiel:  $C = +135^\circ$ ,  $B = 0^\circ$ , Zeile 20130 wird ausgelassen, in Zeile 20150 wird  $B = 180^\circ$  und  $C = 180^\circ - 135^\circ = 45^\circ$ .

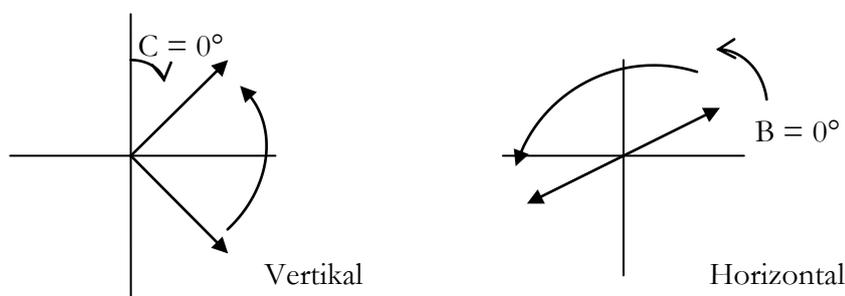


Abbildung 101: Änderung der Winkel B und C

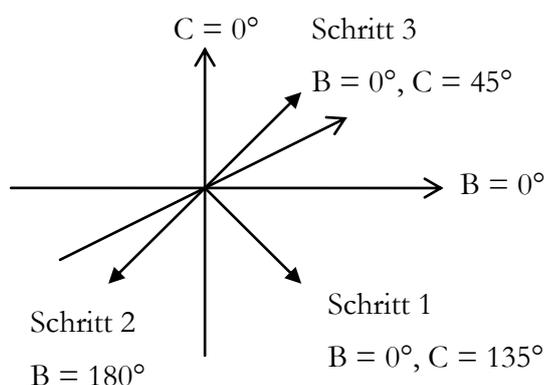


Abbildung 102: Änderung der Winkel (Räumliche Darstellung)

Außerdem wird die Phase  $P_0$  gedreht ( $+180^\circ$ ). Dieses wird für die Berechnung der gesamten Phase benötigt.

B kann Bereiche zwischen  $-360^\circ$  und  $+360^\circ$  annehmen. In dieser Zeile wird, der Bereich von B verkleinert auf  $-180^\circ$  bis  $+180^\circ$ . Beispiel:  $B = -270^\circ$  ergibt ein neues  $B = +90^\circ$ . Diese Umrechnung ist in Matlab ebenfalls überflüssig. Die entsprechenden Zeilen wurden ausgelassen.

**20170 RK = 1: AX = 1: VK = 1: IF ABS(C) < .0002 THEN CC = 1 ELSE CC = COS(C)**

In dieser Zeile werde einige Variablen mit den Anfangswerten belegt.

**20180 IF ABS(B) > PI THEN B = B - 2 \* PI \* SGN(B): GOTO 20180**

B kann Bereiche zwischen  $-360^\circ$  und  $+360^\circ$  annehmen. In dieser Zeile wird, der Bereich von B verkleinert auf  $-180^\circ$  bis  $+180^\circ$ . Beispiel:  $B = -270^\circ$  ergibt ein neues  $B = +90^\circ$ .

**20200 IF ABS(B) > PI / 2 THEN RK = D(4)**

Wenn  $|B|$  größer ist als  $90^\circ$  (Schraffierter Bereich im Diagramm) wird die Rückwärtskorrektur angewendet.

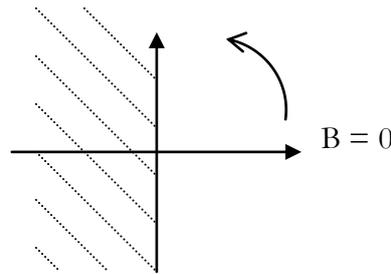


Abbildung 103: Anwendungsbereich des Rückwärtskorrektur-Faktors

Die Größe der Keulen in diesem Bereich wird durch den Faktor  $D(4)$  bestimmt.

$$\text{Amplitude}_{\text{Keule linke Halbebene}} = \text{Amplitude}_{\text{Keule rechte Halbebene}} \times D(4)$$

**20210 ON D(8) GOSUB 20300, 20400, 20500, 20300, 20500**

Je nach Elementart wird in eine andere Zeile gesprungen

**20212 IF ABS(A(X, Y, 2) - A(X, Y, 5)) < .01 THEN BB = A(X, Y, 4) + D(9): WW = A(X, Y, 2): GOTO 20220**

Für den Fall das die Strahlrichtung und die Elementrichtung annähernd übereinstimmen ist die Berechnung des Abstandes zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt simpel: Einfache Addition von Elemententfernung und Bezugspunkt der Antenne. Der Winkel zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt ist gleich der Strahlrichtung.

Kann dieses angewendet werden, wird die komplizierte Berechnung über Sinus und Cosinus übersprungen.

**20214 ENTFR = A(X, Y, 4) \* COS(C1 \* A(X, Y, 5)) + D(9) \* COS(C1 \* A(X, Y, 2))**

**20216 ENTfJ = A(X, Y, 4) \* SIN(C1 \* A(X, Y, 5)) + D(9) \* SIN(C1 \* A(X, Y, 2))**

Stimmen Strahlrichtung und Elementrichtung nicht überein muss die Entfernung zwischen Antennenmastmittelpunkt und Antennenelementmittelpunkt über Sinus und Cosinus berechnet werden (Siehe Abbildung XY).

**20218 RR = ENTFR: JJ = ENTfJ: GOSUB 9200**

In GOSUB 9200 wird der Real- und Imaginärteil in Betrag und Phase umgerechnet

**20220 PH = C1 \* BB \* UF \* COS(C1 \* (AW - WW)) \* CW ' Phase im Bogenmaß**

In Zeile 20220 wird die horizontale Phasendifferenz bestimmt.

**20230 A = AX \* VK \* A(X, Y, 0)**

Die gesamte Amplitude setzt sich aus 3 Faktoren zusammen: Horizontaler Faktor, vertikaler Faktor und der Amplitude des Antennenelementes. Der horizontale und vertikale Faktor wird je nach Elementart auf unterschiedliche Weise bestimmt (Zeile 20300 bis 20570).

**20240 P = PH + P0 + C1 \* (A(X, Y, 6) \* UF \* SW + A(X, Y, 1) \* FM / D(6) + A(X, Y, 7))' Phase in Bogenmaß**

In Zeile 20240 wird die gesamte Phase bestimmt. Die setzt sich zusammen aus der horizontalen Phasendifferenz (Berechnet in Zeile 20220), aus der Phasendrehung P0, die entweder 0° oder 180° entspricht, der vertikalen Phasendifferenz (äquivalent berechnet wie die horizontale Phasendifferenz), der Phasendifferenz entstehend aus der Speisephase der Rechenfrequenz und der Nennfrequenz und der konstanten Phase des jeweiligen Elementes.

Würde in Zeile 20220 und 20240 statt CW und SW direkt der Erhebungswinkel verwendet werde würde keine korrekte Addition der Phasen durchgeführt werden. Grund: Im 3-dimensionalen Raum ist die diagonale Strecke durch einen Würfel kürzer als wenn aus beiden Ebenen die Einzelstecken addiert.

**20250 RETURN**

**Ende des Berechnungsteils für die Antennenelemente**

**Beginn der GOSUB-Sprünge**

**20300 IF ABS(C) < .0002 GOTO 20400' \*\*\* FELD ODER YAGI \*\*\***

Wird ausgeführt bei Elementart 1 oder 4 (FELD ODER YAGI).

Wenn C (ϑ) annähernd 0 ist, d.h. normales Horizontaldiagramm, wird in Zeile 20400 gesprungen.

**20330 IF D(8) = 4 THEN D = 180 \* C / D(1) \* FM / D(6): VK = SIN(D) / D: GOTO 20400'\*\*\* YAGI \*\*\***

Für YAGI-Antennen wird VK mit der Formel aus Zeile 20330 bestimmt.

$$VK = \sin\left(\frac{180 \vartheta}{\text{Vertikaler Nullwinkel}} \frac{\text{Rechenfrequenz}}{\text{Nennfrequenz}}\right)$$

**20360 VK = .4 + .6 \* CC: IF D(5) > 1 THEN D = C1 \* D(7) / 2 \* UF \* SIN(C) ELSE 20400'\*\*\* FELD \*\*\***

**20380 VK = VK \* SIN(D(5) \* D) / D(5) / SIN(D)**

Für ein Antennenfeld wird VK mit der Formel aus Zeile 20360 bestimmt.

$$VK = 0.4 + 0.6 CC$$

Gibt es mehr als eine Dipolebene wird VK mit folgender Formel bestimmt:

$$D = \frac{\pi}{180} \frac{\text{Dipolabstand}}{2} \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\vartheta)$$

$$VK = \frac{VK \sin(D(5) D)}{D(5) \sin(D)}$$

**20400 IF PL\$ = VK\$ THEN VK = VK \* (.944 \* CC + .0548 \* COS(3 \* C) + .0012 \* COS(5 \* C)) ELSE 20430**

**20410 AX = COS(C1 \* A(X, Y, 3) \* SIN(B))**

Wird ausgeführt bei Elementart 2 (Dipol) bzw. als Fortführung von Elementart 1 oder 4 (besonders Horizontalfelder).

Ist die Polarisation vertikal, dann wird VK berechnet mit

$$VK = VK (0.944 CC + 0.0548 \cos(3 C) + 0.0012 \cos(5 C))$$

$$AX = \cos(C1 A(X, Y, 3) \sin(B))$$

**20420 IF D(8) = 2 THEN RETURN' \*\*\*\* VERTIKALER DIPOL \*\*\*\***

Wenn es sich um einen vertikalen Dipol handelt wird in das normale Programm zurückgesprungen.

**20430 IF ABS(B) > .001 THEN AX = AX \* RK \* (COS(B) + D(2) \* COS(3 \* B)) / (1 + D(2))**

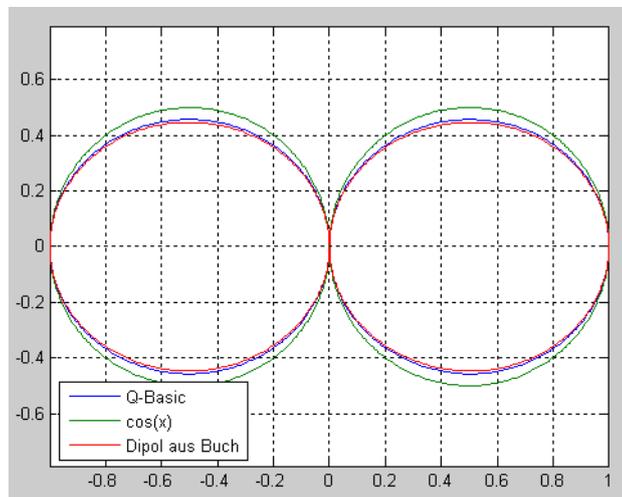
**20440 RETURN**

Anderenfalls wird, wenn B 1° oder größer ist, AX berechnet:

$$AX = \frac{AX RK (\cos(B) + D(2) \cos(3 B))}{1 + D(2)}$$

Diese Formel ergibt im Polardiagramm eine Acht, die sich abhängig von der Wahl von D(2) mehr oder weniger stark von einer Cosinus-Funktion unterscheidet. Wird D(2) mit 0.06 gewählt, entspricht die Kurve fast der Dipolfunktion aus der Literatur.

$$c(\vartheta, \varphi) = \left| \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l \cos(\vartheta)\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right)}{\sin(\vartheta)} \right|$$



**Abbildung 104: Vergleich von Dipolgleichungen**

Quelle: Eigene Darstellung mit Matlab

**20450 '**

**20500 AX = 0: VK = 0: ST = 1: IF D(8) = 3 THEN ST = 2'SuperTStile\*\*\*\* FOURIER-SYNTHESE \*\*\***

Dieser Abschnitt wird ausgeführt wenn es sich um Elementart 3 oder 5 handelt (Super T Stile bzw. Anwendung der Fourier-Synthese).

Zu Beginn wird der horizontale und vertikale Faktor auf 0 gesetzt. Für Elementart 5 ist die Schrittweite =1 für Elementart 3 ist die Schrittweite =2.

**20540 FOR A = 0 TO 9 STEP 2**

**20550 IF ABS(B) < .0001 THEN AX = 1 ELSE AX = AX + H(A) \* COS(A \* B)**

**20560 IF ABS(C) < .0001 THEN VK = 1 ELSE VK = VK + V(A) \* COS(A \* C)**

**20570 NEXT A**

*Horizontaler Faktor :*

$$\sum_{a=0}^9 H(a) \cos(a B)$$

*Vertikaler Faktor:*

$$\sum_{a=0}^9 V(a) \cos(a C)$$

Es gibt 10 Fourier-Koeffizienten die in den 10 Schleifenzyklen der for-Schleife abgearbeitet werden. Ist der Winkel von B oder C näherungsweise 0 ist AX bzw. VK =1, da das Diagramm an dieser Stelle ein Maximum hat. Bei größer werdenden Winkeln wird der hinzukommende Anteil immer kleiner.

## C Matlab-Programm zur Berechnung von Antennendiagrammen

Dieses Programm kann mit folgenden Rechenwegen arbeiten:

- Näherungsgleichungen
- Fourier-Koeffizienten
- Herstellerdaten in 1° Schritten
- Herstellerdaten in 10° Schritten

### C.1 Hauptprogramm

```
%Gesamtprogramm
%Berechnung von Antennendiagrammen unter Angabe verschiedener Daten ueber
%die Antennenelemente. Wahlweise koennen die Fourier-Koeffizienten,
%gemessene Daten (Amplitude und Betrag) oder Formeln
%(Dipol-Naeherungsformeln) verwendet werden.

##### Konfiguration #####

%Spaltenanzahl
spalten=2; %4
%Zeilenanzahl
zeilen=1; %8
%Einlesen aus folgender Datei:
%a(x,y,z)_d(x)_360_grad_flensburg_10Grad_700.txt'
dateiname='a(x,y,z)_d(x)_360_grad_flensburg_10Grad_700.txt'

%sind die Amplitude und die Phase in 1 oder 10 Grad schritten bekannt?
%gar nicht bekannt = 0;
%bekannt in 1 Grad Schritten = 1
%bekannt in 10 Grad Schritten = 10
einlesen_1_oder_10_Grad=10;

%Rechen-Frequenz in MHz
rechen_frequ_FM=434;

%Welche Polarisation?
%Wenn horizontal = 1;
%wenn vertikal = 0;
polarisation= 1;

##### Berechnung #####

%Datei einlesen + interpolieren (wenn notwendig)
[antenne_allg,hori_four,vert_four,antenne_individ,ampl_360,phase_360] =
einlesen(zeilen,spalten,dateiname,einlesen_1_oder_10_Grad);

%Funktion zur Berechnung des Antennendiagramms
[Diagramm_daten]=
winkel(zeilen,spalten,antenne_allg,hori_four,vert_four,antenne_individ,
rechen_frequ_FM,einlesen_1_oder_10_Grad,ampl_360,phase_360,
polarisation);

%Funtion zum plotten
ausgabe(Diagramm_daten);
```

## C.2 Funktion zum Durchlaufen der Winkel

```

%Berechnung von Phase und Betrag bei allen Winkeln
%Es werden mit jedem Winkel die Elemente (Zeilen und Spalten) durchlaufen
%der Real- und Imaginarteil werden berechnet und in Phase und Betrag
umgerechnet
%Unterfunktionen:
%durch_zeilen_und_spalten
%betrag_phase
function[betrag_azi]= winkel(zeilen,spalten,
antenne_allg,horiz_four,vert_four,antenne_individ,
rechen_frequ_FM,einlesen_1_oder_10_Grad,ampl_360,phase_360, polarisation)

% Definitionen:
rad_fak= pi/180;%Umrechnung Bogenmaß
%Angabe des zu berechnenden Bereichs
anf_winkel_vert= 0;      %Anfangswinkel vertikal
end_winkel_vert= 0;      %Endwinkel vertikal
schritt_vert=1;          %Schrittweite vertikal
anf_winkel_horiz= 0;     %Anfangswinkel horizontal
end_winkel_horiz= 360;   %Endwinkel horizontal
schritt_horiz=1;         %Schrittweite horizontal

wellenzahl= 1.200831 * rechen_frequ_FM; %2*pi/lambda= 360*f/c

%Vorbelegen des Real- und Imaginarteils (Summe aller Zeilen und Spalten)
real = zeros(end_winkel_horiz+1,end_winkel_vert+1);
imag = zeros(end_winkel_horiz+1,end_winkel_vert+1);

%2 Schleifen fuer Erhebungswinkel und Azimutwinkel
for erheb_winkel= anf_winkel_vert: schritt_vert: end_winkel_vert
    for azimuth_winkel= anf_winkel_horiz: schritt_horiz: end_winkel_horiz

        %Nullsetzen der Variablen bei Beginn von jedem neuen Winkel
        real_einzel=0;
        imag_einzel=0;

        %Funtion: Schleife fuer den Durchlauf der Zeilen und Spalten
        [real_einzel,imag_einzel]=zeilen_und_spalten (spalten, zeilen,
antenne_allg,horiz_four,vert_four,antenne_individ,erheb_winkel,az
imut_winkel,rechen_frequ_FM,einlesen_1_oder_10_Grad,ampl_360,pha
se_360,polarisation,real_einzel,imag_einzel,rad_fak,wellenzahl);
        %Nutzt zur Berechnung die Unterprogramme AX_VK_Elementart und
berch_phase_amplitude

        %Aufaddierte Real- und Imaginarteil fuer jeden Winkel ablegen
        real(azimut_winkel+1,erheb_winkel+1)= real_einzel;
        imag(azimut_winkel+1,erheb_winkel+1)= imag_einzel;

    end % Ende Azim
end %Ende Erheb

%Funktion zum Umrechnen von zuvor berechnetem Real und Imag.-Teil in
Betrag und Phase

[betrag_azi] =
Berechne_Betrag_Phase(real,imag,end_winkel_horiz,end_winkel_vert);

```

### C.3 Funktion zum Durchlaufen der Zeilen und Spalten

```

%Beinhaltet 2 Schleifen die durch alle Zeilen und Spalten der Elemente
%laufen.
%Interne Funktionen: AX_VK_Elementart, berch_phase_amplitude
function [real_einzel,imag_einzel]=zeilen_und_spalten
(spalten,zeilen,antenne_allg,hori_four,vert_four,antenne_individ,erheb_wi
nkel,azimut_winkel,rechen_frequ_FM,einlesen_1_oder_10_Grad,ampl_360,phase
_360, polarisation,real_einzel,imag_einzel,rad_fak,wellenzahl)

%Variablen z.B. zum Berechnen der Phasendifferenz
CW= cos(rad_fak * erheb_winkel);
SW= sin( rad_fak * erheb_winkel);

%Durchlaufen der Zeilen und Spalten der Gesamtantenne
for x= 1:spalten
    for y=1:zeilen
        %Bei jedem neuen Antennenelement muss der horizontale und der
        %vertikale Amplitudenfaktor auf 1 gesetzt werden
        hor_ampl_fak=1;
        vert_ampl_fak=1;

        if (abs(antenne_individ(x,y,2+1) -antenne_individ(x,y,5+1)) <
0.01) %Strahlrichtung - Elementrichtung
            %Berechnen von betrag(Strecke) und winkel zwischen
            Mastmittelpunkt und Antennenmittelpunkt
            %Elementrichtung und Strahlrichtung gleich,
            %einfachster Fall
            winkel_ant= antenne_individ(x,y,2+1);
            if einlesen_1_oder_10_Grad==0
                %Wenn die Fourier-Koeffizienten benutzt werden muss der
                %Bezugspunkt fuer die Entfernung von Mast verwendet
                werden.
                betrag_entf= antenne_individ(x,y,4+1)+ antenne_allg(9+1);
            else
                %Bei Messwerte benoetigt man keinen Bezugspunkt
                betrag_entf= antenne_individ(x,y,4+1)
            end
        else
            %Elementrichtung und Strahlrichtung ungleich
            if (einlesen_1_oder_10_Grad==0)
                %Wenn die Fourier-Koeffizienten benutzt werden muss der
                %Bezugspunkt fuer die Entfernung von Mast verwendet
                werden (Phasenzentrum).
                entf_real= antenne_individ(x,y,4+1) * cos(rad_fak *
                antenne_individ(x,y,5+1)) + antenne_allg(9+1) * cos
                (rad_fak *antenne_individ(x,y,2+1));
                entf_imag= antenne_individ(x,y,4+1) *sin(rad_fak *
                antenne_individ(x,y,5+1)) + antenne_allg(9+1) * sin
                (rad_fak *antenne_individ(x,y,2+1));
                betrag_entf= abs((entf_real + entf_imag *1i));
                winkel_ant= angle (entf_real + entf_imag *1i);
            else
                %Bei Messwerte benoetigt man keinen Bezugspunkt
                winkel_ant= antenne_individ(x,y,2+1);
                betrag_entf= antenne_individ(x,y,4+1);
            end
        end
    end
end
end

```

```

%Berechnen von phi und theta:
%Winkel in rad zwischen Elementrichtung/Strahlrichtung und
Azimutwinkel
%bzw. Erhebungswinkel
phi_b= rad_fak * (azimut_winkel - antenne_individ(x,y,2+1));
theta_c= rad_fak * (erheb_winkel - antenne_individ(x,y,3+1) *
sign(cos(phi_b)));
p0=0;

if abs(theta_c) < 0.0002
    theta_cc=1; %cc
else
    theta_cc= cos(theta_c); %cc
end

RK= 1;
if abs(phi_b)> pi/2      %Rueckwaertskorrektur
    RK= antenne_allg(4+1);
end

%Berechnen der horizontalen und vertikalen Amplitudenfaktoren in
%Abhaengigkeit der Elementart
if einlesen_1_oder_10_Grad==0
    [hor_ampl_fak, vert_ampl_fak]=Berechne_hor_ver_ampl_Fakt
    (x,y,antenne_allg,antenne_individ,theta_c,rechen_frequ_FM,
    theta_cc, phi_b, hori_four, vert_four,hor_ampl_fak,
    vert_ampl_fak,RK, polarisation);
end

%Funktion zur Bestimmung der Phase und der Amplitude

[real_einzel,imag_einzel]=Berechne_Phase_Amplitude(real_einzel,imag_einze
l, x,y,rad_fak, betrag_entf, wellenzahl, azimut_winkel, winkel_ant,CW,
hor_ampl_fak, vert_ampl_fak,antenne_individ , p0, SW, rechen_frequ_FM,
antenne_allg,ampl_360,phase_360,einlesen_1_oder_10_Grad );

    end %Ende 1 bis 4
end %Ende 1 bis 8

```

#### C.4 Funktion zum Berechnen der horizontale und vertikale Amplitudenfaktoren

%je nach Elementart wird der horizontale und vertikale Amplitudenfaktor auf unterschiedlichen Wegen berechnet

```

function [hor_ampl_fak,
vert_ampl_fak]=Berechne_hor_ver_ampl_Fakt(x,y,antenne_allg,antenne_indivi
d,theta_c,rechen_frequ_FM, theta_cc, phi_b, hori_four,
vert_four,hor_ampl_fak, vert_ampl_fak,RK, polarisation)

%Abhaengig von der Elementart werden unterschiedliche Berechnungswege
gewaehlt
% bei 1 oder 4 :Feld oder Yagi
if (antenne_allg(8+1)==1 || antenne_allg(8+1)==4) && (abs(theta_c) <
0.0002)
    if antenne_allg(8+1)==4
        %Yagi
        %D ist eine Hilfsvariable
        D= 180 * theta_c/antenne_allg(1+1) *rechen_frequ_FM
/antenne_allg(6+1) ;
        vert_ampl_fak= sin (D)/D;
    end
end

```

```

else
    %Feld
    vert_ampl_fak= 0.4 + 0.6 * theta_cc; %cc
    if antenne_allg(5+1) > 1
        %mehr als eine Dipolzeile
        D= rad_fak * antenne_allg(7+1)/2 * wellenzahl *
            sin(theta_cc);
        vert_ampl_fak= vert_ampl_fak * sin (antenne_allg(5+1)* D) /
            antenne_allg(5+1)/ sin (D);
    end
end
end

%Berechnung des Dipols (Elementart = 2), aber auch Fortfuehrung von Feld
bzw. Yagi
if (antenne_allg(8+1)==2 || antenne_allg(8+1)==1 || antenne_allg(8+1)==4)
    if polarisation == 0
        %vertikal
        vert_ampl_fak= vert_ampl_fak * (0.944 * theta_cc + 0.0548 * cos
            (3* theta_c) + 0.0012* cos(5*theta_c));%cc
        hor_ampl_fak= cos(rad_fak* antenne_individ(x,y,3+1)* sin(phi_b));
        if (antenne_allg(8+1)~=2 &&(abs(phi_b) > 0.001))
            %wenn kein Dipol
            hor_ampl_fak= hor_ampl_fak* RK* (cos(phi_b) +
                antenne_allg(2+1) * cos (3* phi_b))/ (1+ antenne_allg(2+1));
        end
    else
        %horizontal
        if abs(phi_b) > 0.001
            hor_ampl_fak= hor_ampl_fak* RK* (cos(phi_b) +
                antenne_allg(2+1) * cos (3* phi_b))/ (1+ antenne_allg(2+1));
        end
    end
end
else
    % Fuer Elementart 3 oder 5 (Super T Stile, Fourier-Koeffizienten)
    hor_ampl_fak=0;
    vert_ampl_fak=0;
    ST=1; %Schrittweite
    % Bei Super T Stile wird die doppelte Schrittweite verwendet
    % (jeder 2 Fourier-Koeffizient)
    if antenne_allg(8+1)==3 % Super T Stile
        ST=2;
    end
    %bestimmen vom vertikalen und horizontalen Amplitudenfaktor
    for k= 0:ST:9
        if abs(phi_b) < 0.0001
            %Wenn phi fast Null ist der horizontale Faktor = 1 (maximal)
            hor_ampl_fak=1;
        else
            % Wenn phi groesser ist wird der horizontale Faktor ueber
            % die Fourier-Koeffizienten berechnet
            hor_ampl_fak= hor_ampl_fak + hori_four(k+1) * cos(k * phi_b);
        end
        if abs(theta_c) < 0.0001
            %Wenn theta fast Null ist der vertikale Faktor = 1
            % (maximal)
            vert_ampl_fak=1;
        else
            % Wenn theta groesser ist wird der vertikale Faktor ueber
            % die Fourier-Koeffizienten berechnet
            vert_ampl_fak= vert_ampl_fak + vert_four(k+1) * cos(k *
                theta_c);
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

```

## C.5 Funktion zum Berechnen der Amplitude und Phase

%Berechnet die Phase und Amplitude der Einzelelemente und addiert sie zur %Summe ueber alle Elemente bei einem Winkel.

```

function
[real_einzel,imag_einzel]=Berechne_Phase_Amplitude(real_einzel,imag_einzel,
x,y,rad_fak, betrag_entf, wellenzahl, azimuth_winkel, winkel_ant,CW,
hor_ampl_fak, vert_ampl_fak, antenne_individ, p0, SW, rechen_frequ_FM,
antenne_allg ,ampl_360,phase_360,einlesen_1_oder_10_Grad)

```

```

% Wenn 360 Grad Daten nicht vorhanden sind ist einlesen_0_360==0
if einlesen_1_oder_10_Grad==0
    %Berechnung der horizontale Phasenunterschiede
    phase_in_bog__PH= rad_fak * betrag_entf * wellenzahl * cos(rad_fak *
    (azimut_winkel-winkel_ant))*CW;%Vermutlich durch unterschiedliche
    Entfernung
    %Berechnung der Amplitude
    amp= hor_ampl_fak * vert_ampl_fak * antenne_individ(x,y,0+1);
    %Berechnung der gesamten Phase
    %Vertikalabstand + Speisephase + Nennfrquenz Konstante Phase
    pha= phase_in_bog__PH+ p0+ rad_fak * ((antenne_individ(x,y,6+1) *
    wellenzahl * SW + antenne_individ(x,y,1+1))* rechen_frequ_FM/
    antenne_allg(6+1) + antenne_individ(x,y,7+1));

else
    %wenn die 360 Grad Daten vorhanden sind:
    %es muss ueberall der Winkel (Antennenmastmitte-Ermittlung)
    %addiert werden, da die Antenne um diesen Winkel gedreht ist und
    %die Daten (0-360 Grad) fuer eine nach 0 Grad strahlende Antenne ist.

    %Berechnung der horizontale Phasenunterschiede
    % if (azimut_winkel+round(winkel)+1)<360
    phase_in_bog__PH= rad_fak * betrag_entf * wellenzahl * cos(rad_fak *
    abs(azimut_winkel -antenne_individ(x,y,5+1)))*CW;
    %Berechnung der Amplitude
    %fuer den Fall dass azimuth_winkel + winkel_ant groesser als 360 Grad
    amp= ampl_360(mod(azimut_winkel- round(winkel_ant)+360,360)+1);%
    %Berechnung der gesamten Phase
    pha= phase_360(mod(azimut_winkel-round(winkel_ant)+360,360)+1)
    +phase_in_bog__PH +p0 + rad_fak * ((antenne_individ(x,y,6+1) *
    wellenzahl * SW + abs(antenne_individ(x,y,1+1)))* rechen_frequ_FM/
    antenne_allg(6+1) + antenne_individ(x,y,7+1));

end
%Aufaddieren der einzelnen Zeilen- und Spaltenanteile
real_einzel= real_einzel+ amp * cos(pha);
imag_einzel= imag_einzel+ amp * sin(pha);

```

## C.6 Funktion zum Umrechnen von Real- und Imaginärteil in Betrag und Phase

```

%In dieser Funktion wird die Umrechnung von Real- und Imaginärteil in
%Betrag und Winkel durchgeführt
function[betrag_azi_2] =
Berechne_Betrag_Phase(real,imag,end_winkel_horiz,end_winkel_vert)

maxim=0; %Maximum der Amplituden
winkel_azi=1:end_winkel_horiz+1; %Vorbelegung
betrag_azi=1:end_winkel_horiz+1; %Vorbelegung
betrag_azi_2=1:end_winkel_horiz+1; %Vorbelegung

%Umrechnung von Real- und Imaginärteil in Betrag und Winkel
for x1= 1:end_winkel_horiz+1 %361
    for y1= 1:end_winkel_vert+1 %181
        winkel_azi(x1)= angle (real(x1,y1) + imag(x1,y1)*1i);
        betrag_azi(x1)= abs((real(x1,y1) + imag(x1,y1) *1i));
        %Das Maximum ueber alle Winkel wird ermittelt (fuer die
Normierung)
        if (betrag_azi(x1) >maxim )
            %Maximum ermitteln
            maxim= betrag_azi(x1);
        end
    end
end
end

%Normierung des Maximums auf 1
for x1= 1:end_winkel_horiz+1 %361
    betrag_azi_2 (x1)=betrag_azi(x1)/maxim;
end
end

```

## C.7 Funktion zum Ausgeben des Antennendiagramms

```

%Funktion zur Ausgabe der Amplitude
function[] = ausgabe(betrag_azi)
%Vektor zum Zeichnen des Diagramms (1Gradschritte in Bogenmaß)
t=linspace(0,2*pi,361);

%Fenstername-angabe
figure('Name','Amplitude im Polardiagramm',...
    'NumberTitle','off');
%plot
polar(t,(betrag_azi),'-r');

```

## D Matlab-Programm für zwei horizontale Dipole

Matlab Programm für zwei Dipole in einer horizontalen Dipolzeile aus Kapitel 5.1.1.3. Dort wird ein Vergleich zwischen dem Matlab-Programm und Gleichungen aus der Literatur durchgeführt. Der folgende Quellcode berechnet mit Gleichungen aus der Literatur das Antennendiagramm.

```
% 2 Dipole in einer horizontalen Dipolzeile berechnet mit Gleichungen aus der Literatur
```

```
phi= 0: 0.0175:2*pi
```

```
theta_1 =pi/2;
```

```
beta_0=0;
```

```
abst_pro_wellenla=2/3;
```

```
%Formel aus der Literatur
```

```
c_hori1= sin (phi).*abs(2* cos (beta_0/2 + pi * abst_pro_wellenla * sin(phi)));
```

```
%Für die richtige Darstellung muss die 2. Hälfte des Vektors negiert werden
```

```
for x= 0:1:360
```

```
    if x > 180
```

```
        c_hori1(x)= (-1)* c_hori1(x);
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Drehen des Diagramms
```

```
for x= 1:1:360
```

```
    if x < 270
```

```
        c_hori2(x) = c_hori1(x + 90 );
```

```
    else
```

```
        c_hori2(x) = c_hori1(x + 90 - 360 + 1);
```

```
    end
```

```
end
```

```
X=c_hori2.*cos(phi);
```

```
Y=c_hori2.*sin(phi);
```

```
%Fuer Polardiagramm-Darstellung
```

```
[THETA1,RHO1] = cart2pol(X,Y);
```

```
t1= 0:0.01744:2*pi;
```

```
FIG1=figure('Name','Polardiagramm Horizontal',...
```

```
    'NumberTitle','off');
```

```
polar(THETA1,RHO1)
```

```
title('2 horizontale Dipole in einer horizontalen Dipolzeile ',...
```

```
    'FontWeight','bold')
```

## E Tabelle des Horizontalkorrekturfaktors

HORIZONTALKORREKTUR D(2)

| AW' | 0.100 | 0.110 | 0.120 | 0.130 | 0.140 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0   | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 5   | 0.993 | 0.993 | 0.993 | 0.993 | 0.992 |
| 10  | 0.974 | 0.973 | 0.972 | 0.971 | 0.970 |
| 15  | 0.942 | 0.940 | 0.938 | 0.936 | 0.934 |
| 20  | 0.900 | 0.896 | 0.893 | 0.889 | 0.886 |
| 25  | 0.847 | 0.842 | 0.837 | 0.832 | 0.827 |
| 30  | 0.787 | 0.780 | 0.773 | 0.766 | 0.760 |
| 35  | 0.721 | 0.712 | 0.704 | 0.695 | 0.687 |
| 40  | 0.651 | 0.641 | 0.630 | 0.620 | 0.611 |
| 45  | 0.579 | 0.567 | 0.556 | 0.544 | 0.533 |
| 50  | 0.506 | 0.493 | 0.481 | 0.469 | 0.457 |
| 55  | 0.434 | 0.421 | 0.409 | 0.396 | 0.385 |
| 60  | 0.364 | 0.351 | 0.339 | 0.327 | 0.316 |
| 65  | 0.296 | 0.285 | 0.274 | 0.263 | 0.252 |
| 70  | 0.232 | 0.222 | 0.213 | 0.203 | 0.194 |
| 75  | 0.171 | 0.163 | 0.155 | 0.148 | 0.140 |
| 80  | 0.112 | 0.107 | 0.101 | 0.096 | 0.091 |
| 85  | 0.056 | 0.053 | 0.050 | 0.047 | 0.045 |

HORIZONTALKORREKTUR D(2)

| AW' | 0.150 | 0.160 | 0.170 | 0.180 | 0.190 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0   | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 5   | 0.992 | 0.992 | 0.992 | 0.992 | 0.991 |
| 10  | 0.969 | 0.968 | 0.968 | 0.967 | 0.966 |
| 15  | 0.932 | 0.930 | 0.928 | 0.926 | 0.925 |
| 20  | 0.882 | 0.879 | 0.876 | 0.873 | 0.869 |
| 25  | 0.822 | 0.817 | 0.812 | 0.808 | 0.803 |
| 30  | 0.753 | 0.747 | 0.740 | 0.734 | 0.728 |
| 35  | 0.679 | 0.670 | 0.663 | 0.655 | 0.647 |
| 40  | 0.601 | 0.591 | 0.582 | 0.573 | 0.564 |
| 45  | 0.523 | 0.512 | 0.502 | 0.491 | 0.481 |
| 50  | 0.446 | 0.435 | 0.424 | 0.413 | 0.402 |
| 55  | 0.373 | 0.361 | 0.350 | 0.339 | 0.328 |
| 60  | 0.304 | 0.293 | 0.282 | 0.271 | 0.261 |
| 65  | 0.242 | 0.231 | 0.221 | 0.211 | 0.201 |
| 70  | 0.184 | 0.175 | 0.166 | 0.158 | 0.149 |
| 75  | 0.133 | 0.126 | 0.118 | 0.111 | 0.105 |
| 80  | 0.086 | 0.081 | 0.076 | 0.071 | 0.066 |
| 85  | 0.042 | 0.039 | 0.037 | 0.034 | 0.032 |

Abbildung 105: Tabelle des Horizontalkorrekturfaktors

## F Messen der elektrischen Länge einer Leitung

In Kapitel 5.2 wird die elektrische Länge einer Leitung gemessen. In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise der Messung beschrieben.

Einstellungen am Network Analyzer HP 8753D:

- Reflexionsmessung S11
- Wählen der Start- und Stoppfrequenz
- kalibrieren auf den Anschluss des Network Analyzer
- Darstellung der Phase wählen
- Marker bei der gewünschten Frequenz positionieren
- Einstellen des Verkürzungsfaktors unter „CAL“ -> „MORE“ -> „VELOCITY FAKTOR“ auf z.B. 0,66 bei Koaxialleitungen

Messung:

- Leitung ohne Abschluss an den Network Analyzer anschließen, es wird ein Sägezahn-förmiges Signal angezeigt
- Unter „MARKER FCTN“ „MARKER->DELAY“ auswählen, das Signal sollte eine einigermaßen gerade waagerechte Linie auf der Nulllinie ergeben, gegebenenfalls nach der Auswahl „SCALE REF“ „ELECTRICAL DEALY“ durch drehen des Rades korrigieren
- Unter „SCALE REF“ „ELECTRICAL DEALY“ auswählen, die elektrisch Länge wird angezeigt, der Wert muss halbiert werden, da es sich um eine Reflexionsmessung handelt

## G Daten der in Kapitel 5.1 verwendeten Antenne K 72 31 47

NAME K 72 31 47

FREQUENCY 550

GAIN

TILT

COMMENT DATE 01-15-2009 K 72 31 47 PHASE HORI

HORIZONTAL 360

| Grad | Amplitude | Phase  | Grad | Amplitude | Phase  | Grad | Amplitude | Phase  |
|------|-----------|--------|------|-----------|--------|------|-----------|--------|
| 0    | 100.00    | 96.00  | 120  | 6.00      | 347.00 | 240  | 6.00      | 347.00 |
| 1    | 99.76     | 96.10  | 121  | 6.00      | 349.30 | 241  | 6.00      | 343.50 |
| 2    | 99.52     | 96.20  | 122  | 6.00      | 351.60 | 242  | 6.00      | 340.00 |
| 3    | 99.28     | 96.30  | 123  | 6.00      | 353.90 | 243  | 6.00      | 336.50 |
| 4    | 99.04     | 96.40  | 124  | 6.00      | 356.20 | 244  | 6.00      | 333.00 |
| 5    | 98.80     | 96.50  | 125  | 6.00      | 358.50 | 245  | 6.00      | 329.50 |
| 6    | 98.24     | 96.60  | 126  | 6.00      | 360.80 | 246  | 6.00      | 326.00 |
| 7    | 97.68     | 96.70  | 127  | 6.00      | 363.10 | 247  | 6.00      | 322.50 |
| 8    | 97.12     | 96.80  | 128  | 6.00      | 365.40 | 248  | 6.00      | 319.00 |
| 9    | 96.56     | 96.90  | 129  | 6.00      | 367.70 | 249  | 6.00      | 315.50 |
| 10   | 96.00     | 97.00  | 130  | 6.00      | 370.00 | 250  | 6.00      | 312.00 |
| 11   | 95.10     | 97.20  | 131  | 5.90      | 373.20 | 251  | 5.90      | 305.60 |
| 12   | 94.20     | 97.40  | 132  | 5.80      | 376.40 | 252  | 5.80      | 299.20 |
| 13   | 93.30     | 97.60  | 133  | 5.70      | 379.60 | 253  | 5.70      | 292.80 |
| 14   | 92.40     | 97.80  | 134  | 5.60      | 382.80 | 254  | 5.60      | 286.40 |
| 15   | 91.50     | 98.00  | 135  | 5.50      | 386.00 | 255  | 5.50      | 280.00 |
| 16   | 90.60     | 98.20  | 136  | 5.40      | 389.20 | 256  | 5.40      | 273.60 |
| 17   | 89.70     | 98.40  | 137  | 5.30      | 392.40 | 257  | 5.30      | 267.20 |
| 18   | 88.80     | 98.60  | 138  | 5.20      | 395.60 | 258  | 5.20      | 260.80 |
| 19   | 87.90     | 98.80  | 139  | 5.10      | 398.80 | 259  | 5.10      | 254.40 |
| 20   | 87.00     | 99.00  | 140  | 5.00      | 402.00 | 260  | 5.00      | 248.00 |
| 21   | 85.50     | 99.30  | 141  | 4.80      | 409.50 | 261  | 4.90      | 242.70 |
| 22   | 84.00     | 99.60  | 142  | 4.60      | 417.00 | 262  | 4.80      | 237.40 |
| 23   | 82.50     | 99.90  | 143  | 4.40      | 424.50 | 263  | 4.70      | 232.10 |
| 24   | 81.00     | 100.20 | 144  | 4.20      | 432.00 | 264  | 4.60      | 226.80 |
| 25   | 79.50     | 100.50 | 145  | 4.00      | 439.50 | 265  | 4.50      | 221.50 |
| 26   | 78.00     | 100.80 | 146  | 3.80      | 447.00 | 266  | 4.40      | 216.20 |
| 27   | 76.50     | 101.10 | 147  | 3.60      | 454.50 | 267  | 4.30      | 210.90 |
| 28   | 75.00     | 101.40 | 148  | 3.40      | 462.00 | 268  | 4.20      | 205.60 |
| 29   | 73.50     | 101.70 | 149  | 3.20      | 469.50 | 269  | 4.10      | 200.30 |
| 30   | 72.00     | 102.00 | 150  | 3.00      | 477.00 | 270  | 4.00      | 195.00 |
| 31   | 70.40     | 102.60 | 151  | 3.20      | 482.80 | 271  | 4.60      | 191.60 |
| 32   | 68.80     | 103.20 | 152  | 3.40      | 488.60 | 272  | 5.20      | 188.20 |
| 33   | 67.20     | 103.80 | 153  | 3.60      | 494.40 | 273  | 5.80      | 184.80 |
| 34   | 65.60     | 104.40 | 154  | 3.80      | 500.20 | 274  | 6.40      | 181.40 |
| 35   | 64.00     | 105.00 | 155  | 4.00      | 506.00 | 275  | 7.00      | 178.00 |
| 36   | 62.40     | 105.60 | 156  | 4.20      | 511.80 | 276  | 7.60      | 174.60 |
| 37   | 60.80     | 106.20 | 157  | 4.40      | 517.60 | 277  | 8.20      | 171.20 |
| 38   | 59.20     | 106.80 | 158  | 4.60      | 523.40 | 278  | 8.80      | 167.80 |
| 39   | 57.60     | 107.40 | 159  | 4.80      | 529.20 | 279  | 9.40      | 164.40 |
| 40   | 56.00     | 108.00 | 160  | 5.00      | 535.00 | 280  | 10.00     | 161.00 |
| 41   | 54.60     | 108.90 | 161  | 5.50      | 535.80 | 281  | 10.60     | 158.70 |
| 42   | 53.20     | 109.80 | 162  | 6.00      | 536.60 | 282  | 11.20     | 156.40 |
| 43   | 51.80     | 110.70 | 163  | 6.50      | 537.40 | 283  | 11.80     | 154.10 |
| 44   | 50.40     | 111.60 | 164  | 7.00      | 538.20 | 284  | 12.40     | 151.80 |

|     |       |        |     |       |        |     |       |        |
|-----|-------|--------|-----|-------|--------|-----|-------|--------|
| 45  | 49.00 | 112.50 | 165 | 7.50  | 539.00 | 285 | 13.00 | 149.50 |
| 46  | 47.60 | 113.40 | 166 | 8.00  | 539.80 | 286 | 13.60 | 147.20 |
| 47  | 46.20 | 114.30 | 167 | 8.50  | 540.60 | 287 | 14.20 | 144.90 |
| 48  | 44.80 | 115.20 | 168 | 9.00  | 541.40 | 288 | 14.80 | 142.60 |
| 49  | 43.40 | 116.10 | 169 | 9.50  | 542.20 | 289 | 15.40 | 140.30 |
| 50  | 42.00 | 117.00 | 170 | 10.00 | 543.00 | 290 | 16.00 | 138.00 |
| 51  | 40.60 | 117.80 | 171 | 10.10 | 543.60 | 291 | 17.20 | 136.70 |
| 52  | 39.20 | 118.60 | 172 | 10.20 | 544.20 | 292 | 18.40 | 135.40 |
| 53  | 37.80 | 119.40 | 173 | 10.30 | 544.80 | 293 | 19.60 | 134.10 |
| 54  | 36.40 | 120.20 | 174 | 10.40 | 545.40 | 294 | 20.80 | 132.80 |
| 55  | 35.00 | 121.00 | 175 | 10.50 | 546.00 | 295 | 22.00 | 131.50 |
| 56  | 33.60 | 121.80 | 176 | 10.60 | 546.60 | 296 | 23.20 | 130.20 |
| 57  | 32.20 | 122.60 | 177 | 10.70 | 547.20 | 297 | 24.40 | 128.90 |
| 58  | 30.80 | 123.40 | 178 | 10.80 | 547.80 | 298 | 25.60 | 127.60 |
| 59  | 29.40 | 124.20 | 179 | 10.90 | 548.40 | 299 | 26.80 | 126.30 |
| 60  | 28.00 | 125.00 | 180 | 11.00 | 549.00 | 300 | 28.00 | 125.00 |
| 61  | 26.80 | 126.30 | 181 | 10.90 | 548.40 | 301 | 29.40 | 124.20 |
| 62  | 25.60 | 127.60 | 182 | 10.80 | 547.80 | 302 | 30.80 | 123.40 |
| 63  | 24.40 | 128.90 | 183 | 10.70 | 547.20 | 303 | 32.20 | 122.60 |
| 64  | 23.20 | 130.20 | 184 | 10.60 | 546.60 | 304 | 33.60 | 121.80 |
| 65  | 22.00 | 131.50 | 185 | 10.50 | 546.00 | 305 | 35.00 | 121.00 |
| 66  | 20.80 | 132.80 | 186 | 10.40 | 545.40 | 306 | 36.40 | 120.20 |
| 67  | 19.60 | 134.10 | 187 | 10.30 | 544.80 | 307 | 37.80 | 119.40 |
| 68  | 18.40 | 135.40 | 188 | 10.20 | 544.20 | 308 | 39.20 | 118.60 |
| 69  | 17.20 | 136.70 | 189 | 10.10 | 543.60 | 309 | 40.60 | 117.80 |
| 70  | 16.00 | 138.00 | 190 | 10.00 | 543.00 | 310 | 42.00 | 117.00 |
| 71  | 15.40 | 140.30 | 191 | 9.50  | 542.20 | 311 | 43.40 | 116.10 |
| 72  | 14.80 | 142.60 | 192 | 9.00  | 541.40 | 312 | 44.80 | 115.20 |
| 73  | 14.20 | 144.90 | 193 | 8.50  | 540.60 | 313 | 46.20 | 114.30 |
| 74  | 13.60 | 147.20 | 194 | 8.00  | 539.80 | 314 | 47.60 | 113.40 |
| 75  | 13.00 | 149.50 | 195 | 7.50  | 539.00 | 315 | 49.00 | 112.50 |
| 76  | 12.40 | 151.80 | 196 | 7.00  | 538.20 | 316 | 50.40 | 111.60 |
| 77  | 11.80 | 154.10 | 197 | 6.50  | 537.40 | 317 | 51.80 | 110.70 |
| 78  | 11.20 | 156.40 | 198 | 6.00  | 536.60 | 318 | 53.20 | 109.80 |
| 79  | 10.60 | 158.70 | 199 | 5.50  | 535.80 | 319 | 54.60 | 108.90 |
| 80  | 10.00 | 161.00 | 200 | 5.00  | 535.00 | 320 | 56.00 | 108.00 |
| 81  | 9.40  | 164.40 | 201 | 4.80  | 529.20 | 321 | 57.60 | 107.40 |
| 82  | 8.80  | 167.80 | 202 | 4.60  | 523.40 | 322 | 59.20 | 106.80 |
| 83  | 8.20  | 171.20 | 203 | 4.40  | 517.60 | 323 | 60.80 | 106.20 |
| 84  | 7.60  | 174.60 | 204 | 4.20  | 511.80 | 324 | 62.40 | 105.60 |
| 85  | 7.00  | 178.00 | 205 | 4.00  | 506.00 | 325 | 64.00 | 105.00 |
| 86  | 6.40  | 181.40 | 206 | 3.80  | 500.20 | 326 | 65.60 | 104.40 |
| 87  | 5.80  | 184.80 | 207 | 3.60  | 494.40 | 327 | 67.20 | 103.80 |
| 88  | 5.20  | 188.20 | 208 | 3.40  | 488.60 | 328 | 68.80 | 103.20 |
| 89  | 4.60  | 191.60 | 209 | 3.20  | 482.80 | 329 | 70.40 | 102.60 |
| 90  | 4.00  | 195.00 | 210 | 3.00  | 477.00 | 330 | 72.00 | 102.00 |
| 91  | 4.10  | 200.30 | 211 | 3.20  | 469.50 | 331 | 73.50 | 101.70 |
| 92  | 4.20  | 205.60 | 212 | 3.40  | 462.00 | 332 | 75.00 | 101.40 |
| 93  | 4.30  | 210.90 | 213 | 3.60  | 454.50 | 333 | 76.50 | 101.10 |
| 94  | 4.40  | 216.20 | 214 | 3.80  | 447.00 | 334 | 78.00 | 100.80 |
| 95  | 4.50  | 221.50 | 215 | 4.00  | 439.50 | 335 | 79.50 | 100.50 |
| 96  | 4.60  | 226.80 | 216 | 4.20  | 432.00 | 336 | 81.00 | 100.20 |
| 97  | 4.70  | 232.10 | 217 | 4.40  | 424.50 | 337 | 82.50 | 99.90  |
| 98  | 4.80  | 237.40 | 218 | 4.60  | 417.00 | 338 | 84.00 | 99.60  |
| 99  | 4.90  | 242.70 | 219 | 4.80  | 409.50 | 339 | 85.50 | 99.30  |
| 100 | 5.00  | 248.00 | 220 | 5.00  | 402.00 | 340 | 87.00 | 99.00  |
| 101 | 5.10  | 254.40 | 221 | 5.10  | 398.80 | 341 | 87.90 | 98.80  |
| 102 | 5.20  | 260.80 | 222 | 5.20  | 395.60 | 342 | 88.80 | 98.60  |
| 103 | 5.30  | 267.20 | 223 | 5.30  | 392.40 | 343 | 89.70 | 98.40  |
| 104 | 5.40  | 273.60 | 224 | 5.40  | 389.20 | 344 | 90.60 | 98.20  |
| 105 | 5.50  | 280.00 | 225 | 5.50  | 386.00 | 345 | 91.50 | 98.00  |
| 106 | 5.60  | 286.40 | 226 | 5.60  | 382.80 | 346 | 92.40 | 97.80  |

|     |      |        |     |      |        |     |       |       |
|-----|------|--------|-----|------|--------|-----|-------|-------|
| 107 | 5.70 | 292.80 | 227 | 5.70 | 379.60 | 347 | 93.30 | 97.60 |
| 108 | 5.80 | 299.20 | 228 | 5.80 | 376.40 | 348 | 94.20 | 97.40 |
| 109 | 5.90 | 305.60 | 229 | 5.90 | 373.20 | 349 | 95.10 | 97.20 |
| 110 | 6.00 | 312.00 | 230 | 6.00 | 370.00 | 350 | 96.00 | 97.00 |
| 111 | 6.00 | 315.50 | 231 | 6.00 | 367.70 | 351 | 96.56 | 96.90 |
| 112 | 6.00 | 319.00 | 232 | 6.00 | 365.40 | 352 | 97.12 | 96.80 |
| 113 | 6.00 | 322.50 | 233 | 6.00 | 363.10 | 353 | 97.68 | 96.70 |
| 114 | 6.00 | 326.00 | 234 | 6.00 | 360.80 | 354 | 98.24 | 96.60 |
| 115 | 6.00 | 329.50 | 235 | 6.00 | 358.50 | 355 | 98.80 | 96.50 |
| 116 | 6.00 | 333.00 | 236 | 6.00 | 356.20 | 356 | 99.04 | 96.40 |
| 117 | 6.00 | 336.50 | 237 | 6.00 | 353.90 | 357 | 99.28 | 96.30 |
| 118 | 6.00 | 340.00 | 238 | 6.00 | 351.60 | 358 | 99.52 | 96.20 |
| 119 | 6.00 | 343.50 | 239 | 6.00 | 349.30 | 359 | 99.76 | 96.10 |

**Abbildung 106: Primärdaten des Antennentyps K 72 31 47 bei einer Frequenz von 550 MHz**

## Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 19. Januar 2010

Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift