

Zusammenfassung

Gleitschirmpiloten greifen zur Orientierung in der Luft auf technische Hilfsmittel zurück. Beispielsweise kommen Variometer zur Höhenbestimmung sowie GPS-Geräte zur Positionsbestimmung zum Einsatz. Die Firma Flytec stellt seit über 30 Jahren verschiedene Fluginstrumente für die Tuchfliegerei her. Diese Instrumente vernetzen eine Reihe von Sonoren. Um eine einwandfreie Datenkommunikation sicher zu stellen, wird ein Bluetooth Netzwerk und einen WiFi Netzwerk zur Verfügung gestellt. Um das Bluetooth Netzwerk in Zukunft mit einem Smartphone zu verbinden, muss das Antennensystem verbessert werden.

Diese Arbeit untersucht ein bestehendes 2.4 GHz „Bluetooth Low Energie Netzwerk“, welches in der „Connect 1“ Gerätefamilie der Firma Flytec AG zu Anwendung kommt. In diesem Gerät kommen drei Antennensysteme zum Einsatz, welche alle in frei zugänglichen ISM Frequenzbereichen arbeiten. Die Systeme beeinflussen sich daher gegenseitig. Die Wahl der Antennen und deren Positionierung beeinflusst das Abstrahlverhalten enorm und ist für eine einwandfreie Funktion äusserst wichtig. In dieser Arbeit wird eine technisch realisierbares Design für die Bluetooth Low Energie Antenne gesucht. Die dafür notwendige Antennentheorie wird beschrieben. Daher soll ein technisch realisierbares Design für eine Bluetooth Low Energie Antenne entwickelt werden. Die Antenne soll in einem Handgerät zur Anwendung kommen. Nach Überprüfung dreier Konzepte in der Entwicklungsphase mit entsprechenden Simulationen im Empire Xcel, entschieden wir uns für das xxx Konzept. Im Hauptteil ist der Entwicklung einer Kompaktantenne, die in einem Handgerät zum Einsatz kommt, gewidmet. Der Entwicklungsprozess besteht einer Vorstudie, bei der drei Konzepte geprüft werden. Aus der Vorstudie wurde das Konzept xxxx ausgewählt.

Das xxxx wurde aufgrund der positiven Eigenschaften im Bereich des xx und yy ausgewählt.

Im Antennenentwicklungsprozess wurden die Antennenparameter genauer untersucht und es werden nach möglichen Einbau und Design Varianten in der „Connect 1“ Geräteserie gesucht. Um eine möglichst optimales Abstrahlverhalten zu finden. Der gesamte Entwicklungsprozess wird von Simulationen der verschiedenen Konzepte begleitet.

Einleitung

Gleitschirmpiloten müssen sich während eines Fluges stets orientieren können, um wieder sicher auf dem Boden zu landen. Da die Orientierung in der Luft ohne fixe Orientierungspunkte sehr anspruchsvoll ist, greifen die meisten Piloten auf technische Hilfsmittel zurück. Beispielsweise kommen Variometer zur Anwendung, welche den Luftdruck messen und somit Höhenunterschiede dokumentieren. Der Pilot kann daraus schliessen, ob er sich im Steig- oder Sinkflug befindet und auf welcher Höhe er sich gerade befindet. Des Weiteren nutzen viele Piloten GPS-Geräte zur Positionsbestimmung. Um dem Piloten unabhängig vom Hilfsgerät zu machen, erfolgt die Informationsvermittlung akustisch. So wird der Sinkflug zum Beispiel mit einem Pipton signalisiert, während beim Steigflug keine akustische Informationsübermittlung erfolgt. Die Firma Flytec stellt seit über 30 Jahren verschiedene Fluginstrumente für die Tuchfliegerei her. Die Instrumente können am Rumpf oder an den Oberschenkelgetragen positioniert werden. Die Informationen werden auf einem berührungssensitiven Anzeige dem Piloten zur Verfügung gestellt.

In dieser Arbeit soll für die neue Fluginstrumentenserie Compact eine Kompaktantenne entwickelt werden, welche im Rahmen des „Near Pilot Netzwerk“ zur Anwendung kommen soll. Initial wird die Ausgangslage dokumentiert und das bisherige Antennensystem beschrieben. In einem weiteren Schritt wird die Theorie der Kompaktantennen erarbeitet, um für das Abstrahlverhalten bessert zu verstehen, und die anschliessenden Simulationen und Antennenmessungen eine gute Grundlage zu erhalten. Aus einem Vorprojekt wird das vielversprechendste Konzept ausgewählt und für den Einsatz in die Geräte Serie Compact der Firma Flytec optimiert. Die Simulationen wiederum werden mit der Theorie verglichen. Abschliessend soll ein Fazit gezogen und weitere Entwicklungsmöglichkeiten vorgeschlagen werden.

Methodik

Diese Bachelor Arbeit beschreibt den Design Prozess eines 2.4 GHz Kompakt Antennen Systems. Es beinhaltet die Studien von Kompakt Antennen sowie deren Abstrahlverhalten. Ein Vorprojekt, welches verschiedene mögliche Antennenkonzepte prüft. Aus diesem Vorprojekt wird das vielversprechendste Konzept ausgewählt und für den Einsatz in die Geräte Serie „Connect 1“ der Firma Flytec optimiert. Dieser Prozess ist von Simulationen und vom erstellen und Ausmessen von Funktionsmustern begleitet. Die Erkenntnisse aus den Messungen und den Vergleichen aus Theorie und Praxis werden im einem Fazit zusammengefasst und es soll das weitere Vorgehen für die Firma Flytec dokumentiert werden. Für diese Bachelorarbeit stehen 15 Wochen zur Verfügung. Diese Zeit wird in die folgenden vier Phasen eingeteilt:

- Recherche- und Theoriephase
- Designphase
- Prototyping
- Dokumentation des Engineeringmodels

Ausgangslage

Die Firma Flytec vernetzt Sensoren und Fluginstrumente drahtlos mit einem „near pilot network“. Ihre Fluginstrumente stellen für die Piloten von Tuchfliegern eine grosse Hilfe dar. Die Navigation in der Luft stellte auch für erfahrene Piloten eine grosse Herausforderung dar. Für ein Fluginstrument der „Connect 1“ Serie soll eine integrierte Kompaktantenne für das ISM Band 2.4 GHz entworfen werden.

Problematik

Diese soll die Kommunikation mit einem Smartphone sicher stellen. Die bisher verwendete Antenne hat nie ihre gewünschte Wirkung gezeigt. Die Antenne wird von dem Bluetooth Low Energie Chip CC2541 der Firma Texas Instruments getrieben. In dem Gerät befinden sich mehrere Antennen die im selben Frequenzbereich arbeiten, die gegenseitige Koppelung der Antennen ist gross und auch von der Wahl der Antennen sowie der Positionierung abhängig. Es soll eine möglichst optimale symmetrisch gespiesene Antennenkonzept für die Bluetoothverbindung erarbeitet werden.

Fragestellung

Für ein Fluginstrument der Compact Serie soll eine integrierte Kompaktantenne für das ISM Band 2.4 - 2.5 GHz entworfen werden, mit dem Ziel zukünftig Daten auf eine Smartphone Applikation zu übertragen, um dem Piloten mit den aktuellen Flugdaten zu versorgen.

Durch das Einarbeiten in die Eigenschaften elektrisch kleiner Antennen soll das Wissen für das Design eines Funktionsmuster im 2.4 ISM Band arbeitenden Antennensystems erlangt werden. Das Design soll mit dem Empire XCell Softwaretool simuliert. Iterativ soll eine symmetrisch gespiesene Kompaktantenne gefunden werden. Die Antenne soll an den komplexen Ausgangswiderstand des Bluetooth CC2541 Chip angepasst werden. Das simulierte Antennensystem soll gefertigt und ausgemessen werden. Die vorliegenden Antennenparameter sollen mit den simulierten Werten verglichen und bewertet werden. Ein Fazit soll den zukünftigen Einsatz in der „Connect 1“ darlegen.

Technische Spezifikationen und Anforderungsliste

Das Design des Antennensystem wird für einen Anwendungsfall im Freiraum dimensioniert. Die Distanz zwischen Sender und Empfänger soll 10 Meter betragen. Das Übertragungsmedium ist Luft kann aber idealisiert als Vakuum angenommen werden. Das System soll isotrop abstrahlen und der Gewinn der Empfangsantenne kann mit einem Faktor 1 angenommen werden. Die Antenne soll symmetrisch gespiesen werden und im 2.4 GHz ISM Band arbeiten. Als Quelle dient ein Bluetooth Low Energie Texas Instruments CC2541 Chip mit 0dBm als Sendeleistung. Als Designkriterien wird eine S11 Dämpfung von 10 dB und eine Reserve von 6 dB dienen.

Nr.	Beschreibung der Anforderung	Wertebereich/Technologie	Anforderung
001	ISM Frequenzbereich	2.4 GHz bis 2.5 GHz	f
002	Speisung der Antenne	symmetrisch	f
003	Reflexionskoeffizient der Antenne S11	10 dB	f
003	Funkdistanz, Arbeitsradius	10m	f

004	Linkbudget Reserve	6dB	f
005	Verbindung zwischen Quelle und Antenne	symmetrisch	w

Ziele der Arbeit

Es soll ein Funktionsmuster für eine integrierte symmetrisch gespiesene Antenne für das ISM 2.4 GHz Band hergestellt werden. Über diese Antenne sollen in Zukunft die Geräte der Connect 1 Serie über Bluetooth mit einem Smartphone kommunizieren können.

Auf der Basis der Theorie der elektrisch kleinen Antennen wird ein Entwurf für ein Antennensystem im 2.4 GHz Band designed. Der Entwurf wird simuliert und dokumentiert. Ein Anpassnetzwerk muss für die komplexe Ausgangsimpedanz ($70 + j30$ Ohm bei 2.440 GHz) des Transsivers soll dimensioniert, simuliert, hergestellt und ausgemessen werden. Der simulierte Entwurf des gesamten Antennensystems wird produziert und dient als Funktionsmuster. Das Abstrahlverhalten des Funktionmusters muss gemessen und dokumentiert werden.

Abweichungen zwischen der Simulation und den Messresultaten sollen dokumentiert und bewertet werden.

Meilensteine

Anhand der oben beschriebenen Arbeitsphasen werden die folgenden vier Meilensteine definiert. Die Meilensteine markieren jeweils das Ende einer Projektphase und haben einen Fertigstellungstermin. Beim Erreichen eines Meilensteins wird die bisherige Arbeit bewertet und Beschlüsse über den weiteren Projektverlauf gefällt. Insgesamt dienen die Meilensteine dem Projektcontrolling.

MS1: Theorie und Recherchenphase abgeschlossen und zu 80% dokumentiert, ein Anforderungsdokument wurde erstellt

MS2: Zwischenpräsentation, Vorstellen der ersten vier Antennenkonzepte

MS3: Design und Prototyping, Antennensystem simulieren, produzieren, messen und bewerten

MS4: Engenieringmodel ist gefertigt und dokumentiert

Grundlagen der Empfangs und Sendetechnik

Antennentheorie

Bevor in die Antennentheorie und das Abstrahlverhalten von Antennen vertieft eingegangen wird, soll zuerst geklärt werden, was eine Antenne ist.

Wie eine elektromagnetische Welle abgestrahlt wird uns was die charakteristischen Eigenschaften von Antennen sind.

eine Antenne

Eine Antenne ist ein Bauteil, welches in der Lage ist, elektromagnetische Felder abzustrahlen und gleichermassen zu empfangen. Elektromagnetische Felder entstehen immer wenn Ladungen beschleunigt und abgebremst werden.

- alle Leitungen die einen Wechselstrom führen strahlen

Da alle oszillierenden Ströme in einem Leiter strahlen, soll die Definition einer Antenne etwas eingeschränkt werden. Eine Antenne ist ein Bauteil, welches in der Lage ist, elektromagnetische Felder in der gewünschten Frequenz effizient und gerichtet und möglichst frei von Reflexion abzustrahlen.

Antennen ermöglichen das kontrollierte abstrahlen von elektrischer Energie in den Freiraum und wider zurück in die Leitung.

Quelle speisst die Antenne

Die elektrische Energie die auf eine Antenne trifft, stammt von einer Hochfrequenz Quelle. Diese hat einen symmetrisches oder asymmetrisches zwei Tor als Ausgang. Die Ausgangsimpedanz dieser Quellen kann komplex oder reell sein. Um möglichst wenig Energie zu verlieren muss der Übergang von der Quelle auf die Leitung angepasst sein, das heisst, der Übergang sollte keine Impedanz Sprünge aufweisen. Um dies zu erreichen werden Anpassnetzwerke zwischen Quelle und Leitung oder am Ende der Leitung beim Übergang zur Antenne eingesetzt. Die Leitergebundene Welle transportiert Energie von der Quelle zur Last. Oft verbindet ein Koaxialkabel, eine Zweidrahtleitung, ein Hohlleiter oder Leiterbahnen auf einem Print die Quelle mit der Last. Wenn die Last eine Antenne ist, so entspricht diese im besten Fall einem unendlichen widerstand.

Die Antennenzuleitung und Antenne

Die Antennenzuleitung wird oft auch Speisung bezeichnet. Der Einspeisepunkt wird Fusspunkt der Antenne genannt. Der Fusspunkt der Antenne wird über die Zuleitung mit der Hochfrequenzquelle verbunden. Die Aufgabe einer Antenne ist es, den geführten Wellentyp einer Zuleitung umzuwandeln in einen Wellentyp, der im freien Raum, also ohne Leitungsstruktur, ausbreitungsfähig ist. Häufig vorkommende Wellentypen in der Antennenspeiseleitung sind die Zweidrahtwellen, die Koaxialwelle und die H10-Welle des Rechteckhohlleiters. In der Antenne findet eine Transformation der Feldstruktur und auch des Feldwellenwiderstand statt. Damit können wir zwei Hauptfunktionen festhalten:

Transformation des elektromagnetischen Wellentyps von der Speiseleitung in einen Freiraum-Wellentyp

Transformation des Wellenwiderstandes auf der Speiseleitung in den Wellenwiderstand Z_{F0} des freien Raumes

Die Leitungstheorie beschreibt wie sich eine Welle in einem Leiter fortpflanzt. Wenn eine Leitung als ideal und somit verlustlos betrachtet wird, so entsteht eine vorwärtslaufende Spannungswelle U_v und je nach Anpassung eine rückwärtslaufende Spannungswelle U_r , die sich an jeder Stelle in z Richtung der Leitung addieren lassen. Die positive z Koordinate beschreibt die Leitung von der Quelle zur Last. Der Strom im Leiter kann genau wie die Spannung eine Vor- und Zurücklaufende Welle ausweisen. Der Strom kann an jedem Punkt auf der Leitung durch die Summation der U_v und U_r Welle geteilt durch den Leitungswiderstand des betrachteten Leitungsabschnitt gebildet werden. Wenn man sich die Leitung als eine unendliche Summe an unendlich dünnen Leiter Stücken vorstellt, so kann jeder einzelne Δz Sektor einzel betrachtet und somit genau berechnet werden.

Stellt man sich eine Hochfrequente Quelle mit einer Zweidrahtleitung vor, die am Ende über keinen Abschlusswiderstand verfügt, so ist das eine offene Leitung. Werden die Enden der Leitung mit einer Länge von je $\lambda/4$ im 90 Grad Winkel von der Leitung abgewinkelt, so entsteht eine $\lambda/2$ Antenne. Denn die beiden $\lambda/4$ Elemente ergeben zusammen die halbe Wellenlänge. Diese Anordnung führt zu einem $\lambda/2$ Dipol mit symmetrischer Speisung.

Antennen Design Faktoren

Wenn eine Antenne die abgeschaltete Energie nicht in alle Richtungen gleichermassen abstrahlt, sondern gewisse Richtungen mit mehr und andere mit weniger Leistung versorgt, so spricht man von Strahlungsfeldern. Die in verschiedene Richtungen abgestrahlte Energie wird (antenna pattern) genannt.

Die total abgestrahlte Leistung verglichen mit der zugeführten Leistung ergibt die Abstrahleffizienz. Sie wird oft mit dem isotropen Kugelstrahler verglichen. Die Abstrahlcharakteristik ist ein oft genannter Design Faktor.

Neben der Abstrahlcharakteristik ist auch die Antennen Impedanz von Bedeutung. Das ist die Impedanz bestehend aus R_{ant} und X_{ant} der X Anteil kann induktiv oder kapazitiv sein, je nach Antenne. Die Anpassung am Fusspunkt der Antenne passt die komplexe Antennen Impedanz an der Impedanz der Transmission Line an. Allgemein bestimmen die geometrischen Faktoren der Antenne die Abstrahlung, ist eine Funktion der Frequenz und der geometrischen Abmessungen der Antenne.

Die Grundlage jeglicher Abstrahlung von elektromagnetischen Feldern ist der Wechselstrom. Aus der Wechselstromlehre ist bekannt, dass ein sich änderndes elektrisches Feld in einem Leiter einen sich ändernden Strom hervorruft und dieser Strom ein Magnetfeld mit sich bringt. Weiter bewirkt jedes sich ändernde Magnet Feld eine Änderung des Elektrischen Feldes. Daraus wird klar, dass ein Elektrischesfeld ein Magnetfeld hervorruft und umgekehrt. Ohne das eine kann das andere nicht existieren. Das gilt in einer Leitung aber auch im freien Raum.

Die Maxwell Gleichungen zeigen diesen Zusammenhang mathematisch auf.

$$\nabla \times \mathbf{H} = d\mathbf{D}/dt$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$$

Die Geschwindigkeit mit der sich eine Elektromagnetische Welle im freien Raum oder in einer Leitung ausbreitet ist von den Materialeigenschaften des Mediums abhängig.

Im Vakuum gilt:

offene Leitung als Strahler

$$1/v_p = \sqrt{\mu \epsilon}$$

Um zu erkennen, dass eine Antenne in ihrer simplen Form als strahlendes Element wirkt, muss zuerst die Leitungstheorie verstanden sein. Wir gehen von einer Spannungsquelle VG mit einer Quelleimpedanz Z_G aus. Diese Quelle wird eine Leitung mit einem Abschlusswiderstand Z_L verbunden. Die Quelle regt eine Spannungswelle in der Leitung an. Die Spannungswelle ist in eine vor und in eine rücklaufende Welle geteilt. Über das Ohmsche Gesetz ist der Strom in der Leitung an jeder Stelle in z Richtung definiert. Genauso wie die Spannungswelle einen Vor und einen Rücklaufendenanteil besitzt, besitzt auch die Stromwelle eine vor- und rücklaufende Welle.

Impedanz einer Leitung

Die Wechselspannungsquelle treibt eine Leitung mit der Impedanz Z_0 .

Von dem DC Verhalten über das AC Verhalten zur Transmission Line Theorie.

Antennen als Wellenwandler

Antennen erzeugen und empfangen elektromagnetische Wellen, die sich im freien ausbreiten. Im Sendefall wandelt die Antenne, die ihr zugeführte Leitung möglichst effizient in elektromagnetische Wechselfelder um. Im Empfangsfall nimmt die Antenne aus einem elektromagnetischen Wellenfeld Leistung auf und stellt sie über ihren Fusspunkt an einer Transmissionen Line zur Verfügung.

Eine leitergeführte Welle wird an ein Eingangstor (Tor 1) geführt. Das Tor 1 stellt den Fusspunkt und somit der Anschlusspunkt einer Antenne dar. Die leitergeführte Welle wird am Tor 1 idealerweise reflexionsfrei aufgenommen. Von der am Fusspunkt eintreffenden Welle wird die Antenne angeregt und erzeugt ein Wechselfeld. Dabei agiert die Antenne als Wandler der leitergeführten Welle in eine Freiraumwelle. Die Freiraumwelle führt Leistung von der Antenne fort. Der Reaktive Teil pendelt zwischen dem Nahfeld und der Antenne hin und her. Mit wachsendem Abstand erscheinen die Freiraumwellen als Ebenen. Dabei spricht man vom Fernfeld sobald der Phasenfehler keiner als ein $1/8$ ist. Als Näherung ist das Fernfeld erreicht wenn der betrachtungspunkt mehr als 2 Wellenlängen von der Antenne entfernt ist. Antennen besitzen eine Dualität, das bedeutet ein Element welches gute abstrahlende Eigenschaften aufweist, besitzt ebenso gute Eigenschaften als Empfänger für elektromagnetische Wellen.

Nahfeld und Fernfeld

Bei der Beschreibung der elektromagnetischen Wellenfelder um eine Antenne, ist die Distanz zur Antenne von grosser Bedeutung. Es macht einen grossen Unterschied ob man die Feldverteilung im unmittelbaren Umfeld der Antenne (dem Nahfeld) oder den Beobachtungspunkt in einer grossen Entfernung (dem Fernfeld) ansetzt. Im Fernfeld steht das Elektrische E Feld und das Magnetische H Feld senkrecht im 90 Grad Winkel aufeinander. Die Wellenfront der beiden Felder bewegt sich in Ausbreitungsrichtung wie eine senkrechte Ebene vorwärts. Das E und H Feld sind in Phase. Es wird als Leistung radial weg von der Antenne transportiert.

Die Feldverteilung des elektromagnetischen Wechselfeld kennt drei markante Zonen:

- Reaktives Nahfeld
- Strahlendes Nahfeld
- Fernfeld

Der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld einer Antenne ist fliessend, es können keine klaren Abgrenzungen gezogen werden. Das Nahfeld zeichnet sich anders als das Fernfeld durch seine stark reaktiven Feldanteile aus. Im reaktiven Nahfeld pendelt die elektrische und magnetische Energie zwischen der Antenne und dem Freiraum hin und her. Man spricht davon, dass die reaktive Feldenergie rund um die Antenne gespeichert wird.

Im Fernfeld dominiert radial orientierte Leistungstransport. Eine elektromagnetische Welle die sich einmal von der Antenne abgelöst hat, breitet sich solange fort, bis ihre gesamte Energie absorbiert ist.

Historisch gesehen haben sich bei der analytischen Betrachtung von Strahlungsproblemen unterschiedliche Näherungen (Fresnel Näherung und die Fruenhofer Näherung) bewährt. Hieraus haben sich Formel für den Abstand den man zur Antenne einnehmen muss, wenn man mit den für das Fernfeld definierten Antennenkenngrössen arbeiten will.

Die beiden Näherungen beschreiben den maximalen Phasenfehler. Der Phasenfehler entsteht durch die sphärische Welle auf eine Linienantenne trifft. Die Näherung besagt, dass von im Fernfeld von einener ebenen Wellenfront ausgegangen wird, dies ist erreicht wenn der Phasenfehler kleiner als $1/8$ ist. Daraus ergibt sich den Ferfeldabstand. Der Fernfeldabstand hängt von der verwendeten Wellenlängen λ und den geometrischen Abmessungen der Antenne ab. Die Näherung für das Fernfeld für elektrisch kurze Antenne treten ab mindestens einem Abstand von r_0 ein.

$$r_0 = 2 * \lambda$$

Bei Antennen deren grösste Antennenabmessungen grösser als die Wellenlänge λ sind, treten die Fernfeldbedingungen erst bei grösseren Abständen ein.

$$r_0 = 2D^2/\lambda$$

Mit:

d0: Minimale Distanz für die Annahme des Fernfeld Kriterium

D: Grösstes des Antennenmass in Meter

λ : Wellenlänge

Das Fernfeld

$r \rightarrow \infty$ einer Antenne hat folgende Eigenschaften:

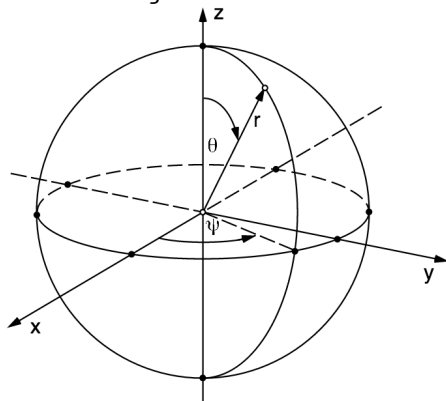
- Die Beiträge der Feldgrössen E und H sind reziprok zum Abstand r
- Die Amplituden der Feldgrössen E und H sind in Phase und 90° versetzt zueinander
- Der Feldwellenwiderstand ZF_0 verknüpft die Feldgrössen: $E = ZF_0 * H$

Kenngrossen von Antennen

Die wichtigsten elektromagnetischen Eigenschaften von Antennen für den Einsatz in Funksystemen lassen sich durch eine Reihe von Kenngrössen beschreiben. Um diese Kenngrössen und ihre Berechnung besser zu veranschaulichen werden sie anhand des Hertzschen Dipol angewendet. Der Hertzsche Dipol ist im Kapitel xxx beschrieben.

Richtdiagramm

Im Fernfeld nimmt die Krümmung der sphärischen Phasenfront einer Kugel immer mehr ab. Für r gegen unendlich kann die Kugelwelle lokal durch eine homogene ebene Wellenfront angenähert werden. Die transversalen Feldkomponenten werden phasengleich, folglich wird nur in radialer Richtung Wirkleistung transportiert. Der Richtwirkung im Raum kommt eine grosse Bedeutung zu. Von ihr hängt es ab, welcher Anteil der gesamten ausgestrahlten Leistung effektiv für den eigentlichen Verwendungszweck genutzt wird. Je nach Verwendungszweck des Antennensystems ist eine bestimmte Feldverteilung über den Raum verlangt. Die Verteilung der Strahlung in verschiedenen Raumrichtungen liefert die Verteilung der Feldstärke in Abhängigkeit des Raumwinkels einer Antenne. Der Raumwinkel wird in Kugelkoordinaten mit den Angaben über theta und phi angegeben. Der Winkel theta gibt die Abweichung von der z Achse an, während der Winkel phi einen Winkel in der xy Ebene angibt. Phi kennt daher Werte von 0 bis 2π . Während theta meist in Werte zwischen 0 und $\pm \pi$ angegeben wird. Die Länge r gibt die Distanz zum Koordinatenursprung an. Eine Aussage über die Richtcharakteristik wird oft im Fernfeld gemacht.



Die Richtcharakteristik eines hypothetischen Kugelstrahlers ist 1, das heisst die abgestrahlte Leistung ist unabhängig von theta oder phi. Dieses Verhalten wird als kugelförmige oder isotrope Abstrahlung genannt.

Die Richtcharakteristik des Elektrischen Feld eines in z Koordinate ausgerichteten Hertzschen Dipols ist $\sin(\theta)$. In polarkoordinaten ergibt das einen doppelten Kreis. Die maximale Richtwirkung des E Feld liegt in der xz Ebene bei einem theta Winkel von 90° . Das ist naheliegend, denn bei 90° ist der sinus 1.

Anstelle von aufwendigen dreidimensionalen Richtdiagrammen kommen zweidimensionale Schnitte durch den Antennenmittelpunkt als Phasenzentrum zum Einsatz. Oft wird das vertikale Richtdiagramm mit theta von 0 bis π und $\phi = 0^\circ$, das entspricht einem Schnitt in der xz Ebene und das horizontale Richtdiagramm mit $\theta = \pi/2$ und ϕ von $\pm \pi$ angegeben, das entspricht einem Schnitt durch die xy Ebene. Lässt man den doppel Kreis, der das E Feld des Hertzschen Dipol um phi rotieren, so tritt das 3D E Feld als Torus hervor.

Ein Mass für den Grad der Energiebündelung bei Richtantennen ist die Breite der Strahlungskeule. Sie wird ausgedrückt durch die vertikalen und horizontalen $\Delta \theta$ und $\Delta \phi$ Winkeln der Hauptkeulen. Das ist der Winkelbereich, innerhalb dessen die

Strahlungsdichte um nicht mehr als die Hälfte der maximalen Strahlungsdichte absinkt. Das bedeutet, die Strahlungsdichte sinkt um 3dB ab. Die Feldstärke fällt in diesem Bereich höchstens um 70.7 Prozent ihres Maximalwertes der Hauptstrahlungsrichtung ab.

Richtfaktor und Gewinn

Der Antennengewinn wird hier anhand einer Sendeantenne behandelt, die Funktionsweise kann für Empfangsantennen übernommen werden. Praktisch ausgeführte Antennen strahlen ihre Energie in bestimmte Raumrichtungen bevorzugt ab. Sie besitzen eine Richtwirkung. Diese Eigenschaft wird durch den Richtfaktor (directivity) und den Antennengewinn beschrieben. Zu seiner Definition benötigt man neben der eigentlichen Antenne eine Bezugsantenne. Die Bezugsantenne dient als Vergleichsgrösse. Verglichen wird in der Regel mit einem fiktiven Kugelstrahler, auch isotroper Strahler genannt, der in alle Raumrichtungen gleichmässig abstrahlt, jedoch praktisch nicht verwirklicht werden kann. Die abgestrahlte Leistung P_S verteilt sich im Abstand r auf einer Kugeloberfläche $4\pi r^2$. Die Leistungsdichte S_i des isotropen Kugelstrahlers beträgt in diesem Abstand daher $S_i = P_S / 4\pi r^2$. Der Index i weist auf den isotropen Strahler als Bezugsantenne hin. Anstelle des Kugelstrahlers wird jetzt die zu untersuchende Antenne an denselben Ort gebracht und mit derselben Leistung P_S gespeist.

Der Richtfaktor D_i ist definiert als das Verhältnis der maximalen Leistungsdichte S_{rmax} der Antenne zur Leistungsdichte der Bezugsantenne, in diesem Fall des Kugelstrahlers.

Im Fernfeld gilt:

$$D_i = S_{rmax} / S_i = 4\pi r^2 \cdot S_{rmax} / P_S$$

Der Richtfaktor wird oft logarithmisch angegeben:

$D_i = 10 \log D_i$ die Einheit entspricht somit dBi.

Der Richtfaktor einer Antenne ist vollständig durch deren Strahlungsfeld, das heisst durch ihre Richtcharakteristik beschrieben. Der Richtfaktor ist ein Mass für die Eigenschaft der Antenne, Energie vorzugsweise in eine Richtung abzustrahlen, beziehungsweise nur aus einer Richtung zu empfangen.

Der Gewinn G einer Antenne ist aus dem Verhältnis der dem Kugelstrahler zugeführten Leistung P_{KS} zur Leistung P_S , die der Antenne zugeführt wird, bestimmbar, wenn beide Leistungen so eingestellt wurden, dass in gleicher Entfernung im Fernfeld $S_{rmax} = S_i$ wird. Der Zusammenhang zwischen G und D ist durch den Antennenwirkungsgrad n mit $0 < n < 1$ gegeben:

$$G = n \cdot D$$

Bei verlustlosen Antennen sind Gewinn und Richtfaktor identisch, da n gleich 1 entspricht. Der messtechnisch ermittelte Antennengewinn G wird in der Praxis häufiger als der Richtfaktor D verwendet. Dies liegt in der Tatsache, dass der rechnerisch ermittelte Richtfaktor für verlustlose Antennen definiert ist, was bei verlustbehafteten Antennen zu Fehlbeurteilung der Antenne führen kann.

Der Gewinn G einer Antenne nichts mit Verstärkung zu tun hat. Es handelt sich um ein Verhältnismass, das die Leistungsdichte der Antenne in einer bestimmten Richtung mit der Leistungsdichte eines isotropen Strahlers vergleicht, der mit derselben Leistung gespeist wird. Die Leistung, welche von der Antenne in einer Richtung durch Bündelung vermehrt abgestrahlt wird, wird der Abstrahlung in andere Richtungen entzogen. Wegen der Dualität hängt der Gewinn einer Antenne nicht davon ab, ob sie als Sende- oder als Empfangsantenne betrieben wird.

elementarer Antennen Dipole

Es gibt zwei elementare Dipole. Der eine stellt eine E Feld Antenne dar, der andere eine H Feld Antenne. Die beiden elementaren Dipole lassen sich nicht praktisch Fertigen, sie dienen nur für theoretische Überlegungen.

Hertzscher Dipol

Ein elektrisch kurzer Linearstrahler kann als konzentriertes Bauelement betrachte werden. Auf seiner gesamten Länge kann die komplexe Amplitude I eine räumlich konstante Stromverteilung, die zeitlich sinusförmig schwingt, annehmen.

Ist ein Hertzscher Dipol unendlich dünn und in einem xyz Koordinatensystem in die z Richtung ausgerichtet so gilt:

Es bildet sich ein E Feld von dem positiven Ladungspunkt zum negativen Ladungspunkt. Die Potentiale der Ladungspunkte oszillieren. Die Ausrichtung der E Feldlinien wechselt bei jeder Schwingung ihre Richtung. Im Nahfeld dominiert das E Feld. Mit Wachsendem Abstand sind das E Feld und das H Feld senkrecht aufeinander und können als ebene Welle betrachtet werden. Die allgemeine Formel für die Feldverteilung lautet:

Formel:

$$\begin{aligned}E_r &= \frac{I dl}{2\pi} e^{-jkR} \left(\frac{n}{R^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon R^3} \right) \cos(\theta) \\E_\theta &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(\frac{j\omega\mu}{R} + \frac{n}{R^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon R^3} \right) \sin(\theta) \\E_\phi &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(\frac{jk}{R} + \frac{n}{R^2} \right) \sin(\theta)\end{aligned}$$

Mit wachsendem Abstand können einige Terme vernachlässigt werden. Alle Terme in denen den Abstand R in höherer Potenz vorkommt werden vereinfacht zu Null. Für das Fernfeld ergeben sich die folgenden Beschreibungen:

Formel:

$$\begin{aligned}E_r &= 0 \\E_\theta &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(\frac{j\omega\mu}{R} \right) \sin(\theta) \\E_\phi &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(\frac{jk}{R} \right) \sin(\theta)\end{aligned}$$

Fitzgeraldscher Dipol

Eine unendlich dünne Leiterschleife die auf der ganzen Länge die selbe Stromverteilung besitzt wird Fitzgeraldscher Dipol genannt. Dieser Dipol ist das Gegenstück zum Hertzschen Dipol und stellt somit den zweiten der beiden elementaren Dipole dar. Die Leiterschleife ist oft in der xy Ebene angeordnet. Wenn der Hertzschen Dipol eine E Feld Antenne genannt wird so ist der Fitzgeraldsche Dipol eine H Feld Antenne. Das Nahfeld des Fitzgeraldschen Dipols wird wie folgt beschrieben:

Formel:

$$\begin{aligned}H_r &= \frac{I dl}{2\pi} e^{-jkR} \left(\frac{jk}{R^2} + \frac{1}{R^3} \right) \cos(\theta) \\H_\theta &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(-\frac{k^2}{R} + \frac{jk}{R^2} + \frac{1}{R^3} \right) \sin(\theta) \\H_\phi &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(\frac{k^2}{R} - \frac{jk}{R^2} \right) \sin(\theta)\end{aligned}$$

Die Terme mit R in der zweiten oder dritten Potenz fallen weg. Da im Fernfeld der Radius R so gross ist, dass diese Terme vernachlässigt werden.

Das Fernfeld kann wie folgt beschrieben werden:

Formel:

$$\begin{aligned} H_r &= 0 \\ H_\theta &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(-\frac{k^2}{R} \right) \sin(\theta) \\ H_\phi &= \frac{I dl}{4\pi} e^{-jkR} \left(\frac{k^2}{R} \right) \sin(\theta) \end{aligned}$$

Die beiden elementaren Dipole können nicht technisch realisiert werden, aber sie sind sehr wichtig für das Verhalten von realen Antennen. Denn wenn reale Antennen vereinfacht werden oder wenn sehr kleine Teilstücke von realen Antennen betrachtet werden, so verhalten sie sich oft wie die elementaren Dipole.

Antennenbauformen

symmetrisch gespiesene Antennen

Es gibt zwei Grundantennenformen, den Hertzschen Dipol und den Fitzgeradscher Dipol. Beide sind symmetrisch gespiesene Antennen. Im Nahfeld des Hertzschen Dipols überwiegt das E Feld also der kapazitive Anteil, während im Nahfeld des Fitzgeraldschen Dipols das H Feld also der induktive Anteil überwiegt. Im Fernfeld sind bei beiden Antennen das H und E Feld gleich stark und nehmen mit zunehmendem Abstand mit dem Faktor $1/R$ ab.

Die Ausrichtung des E und H Feld sind bei den beiden Antennen verschieden.

Das E Feld eines Hertzschen Dipols ist im Fernfeld gleich polarisiert wie der Dipol. Genau umgekehrt ist das Feld des Fitzgeraldschen Dipols. Das H Feld ist in der selben Ebene wie der Dipol.

Praktisch realisierbar ist keine der beiden Antennengrundformen. Sie beruhen auf Annahmen die nicht umsetzbar sind. Beide gehen davon aus, dass die Antennenleiter unendlich dünn sind und dass an jeder Stelle des Leiters die selbe Stromdichte herrscht. Das sind Eigenschaften die wir in Realität nicht vorfinden.

Wenn einige Näherungen und Vereinfachung zugelassen werden, so erhält man die grundlegenden Eigenschaften der elementaren Dipole.

Die Dipol Antenne

Die $\lambda/2$ Dipol Antenne ist eine der am Meisten eingesetzten Antennen. In diesem Abschnitt wird die Dipolantenne die sehr dünne Antennestäbe aus sehr gut leitendem und festen Material beschrieben. Die Länge der Stäbe entspricht einer halben Wellenlänge.

Bei einem Dipol mit der Länge $L = \lambda/2$ bildet sich einen Strombauch über dem Einspeisepunkt aus und der Strom zu den Enden geht gegen null. Die Spannungsverteilung ist umgekehrt, an den Enden eine hohe Spannung und am Einspeisepunkte geht die Spannung gegen Null.

Ein Dipol mit der Länge $L = \lambda$ bilden zwei Strombauche über die ganze Länge des Dipols aus. Beim Einspeise Punkt und den beiden Enden geht der Strom gegen null. In der Mitte der Beiden Antennenteile kommt es zu einem Strom Maximum.

Wichtig bei der Stromverteilung ist, dass der Strom in der Zeit sinusförmig mit der Frequenz f oszilliert. Für die Spannung kann davon ausgegangen werden, dass wo der Strom ein Maximum aufzeigt die Spannung ein Minimum besitzt und umgekehrt.

Die Eingangsimpedanz eines Dipols ist Abhängigkeit von seiner Länge. Man beachte, dass die Eingangsimpedanz oft komplex als $Z = R + jX$ beschrieben ist, wobei R den Ohmschenwiderstand und X die Reaktanz angibt. Die Reaktanz X ist steht für die im Nahfeld gespeicherte Feldenergie.

Man beachte, dass für sehr kleine Dipolantennen, die Eingangsimpedanz kapazitiv ist, das heisst, die Impedanz durch eine negative Reaktanz-Wert (und eine relativ kleine reale Impedanz oder Widerstand) dominiert. Wird der Dipol länger, so erhöht sich der Eingangswiderstand, zusammen mit der Reaktanz. Bei etwas weniger als $L = \lambda$ hat die

Antenne einen Nulldurchgang des Imaginärteils. Hier ist noch ein Ortskurvenbild vorteilhaft.

Wenn die Länge der Dipol Antenne nahe der Wellenlänge des Signals entspricht, wird die Eingangsimpedanz unendlich. Als einfachere Erklärung, kann der Stromverteilung einer $L = \lambda$ langen Antenne betrachtet werden.

Bei der Einspeisestelle geht der Strom gegen Null. Unter Berücksichtigung, dass der Strom nach dem Ohmschen Gesetz $I = U/R$ ist, so ist naheliegen, dass der Widerstand R gegen unendlich gehen muss.

Loop Antenne

Die Loop Antenne ist eine symmetrisch gespiesene Antenne. Eine Loop Antenne ist einem Fitzgeralschen Dipol nach empfunden. Die Loop Antenne wird durch eine dünne Leiterschleife mit einem Radius r dargestellt.

Im Nahfeld der Loop Antenne dominiert der induktive Anteil. Das E Feld ist in der Ebene der Leiterschleife. Das H Feld erscheint 90°Winkel zum E Feld.

Abstrahlcharakteristik

Monopol über leitendem Ground

In der Praxis werden Monopolantennen über Masseflächen mit endlicher Leitfähigkeit und endlicher Grösse verwendet. Dies beeinflusst die Eigenschaften der Monopolantennen, insbesondere das Strahlungsmuster.

Sende Quelle

Als Quelle oder englisch Source bezeichnet man einen Ursprungspunkt. In der Übertragungstechnik ist die Quelle der Ursprungspunkt des Signals. Sie liefert die Signalleistung und speist das Antennensystem.

Bluetooth Chip CC2541

Der Bluetooth Low Energy Chip von Texas Instruments speist das Antennensystem mit einem Signal bei $f_0 = 2.440$ GHz. Dabei nimmt der symmetrische Ausgang des Chip eine Impedanz von $70 + j30$ Ohm an.

Absorption und Schirmung von elektromagnetischen Wellen

Metallische Leiter absorbieren elektromagnetische Wellen. Im allgemeinen werden elektromagnetische Wechselfelder von jeder Art von elektrischen Leitern absorbiert. Im Gehäuse des neuen Fluginstrumentes sind viele verschiedene metallische Leiter vorhanden. Die Hauptplatine, das Touch Display und der Akku, absorbieren einen grossen Teil des Elektrischen Felds. Die Hauptplatine ist eine für die Antennen eine grosse Massefläche. Auch das Display muss als eine grosse Absorptionsfläche betrachtet werden. Ebenfalls absorbierend wirkt das ABS Kunststoff Gehäuse auf die abstrahlende Energie. Da sich alle diese Teile, im Nahfeld befinden, müssen diese bei der Auslegung der Antennenparameter berücksichtigt werden. Dipol- oder Monopolantennen sind typische Quellen für E-Felder. Die E-Felder führen in elektrischen Leitern zu einem Potentialdifferenz, diese führt zu einer Ladungsaustausch, es kommt zu einem Stromfluss und somit zu einer starken Absorption von Energie. In nicht leitenden Materialien führen die Wechselfelder zu dielektrischen Umladungsverlusten. Bei der Antennenentwicklung muss ein besonderes Augenmerk auf die, sich im Nahfeld befindenden Bauteile gelegt werden.

Absorption von statischen beziehungsweise quasistatischen Magnetfeldern können mit hochpermeablen Werkstoffen wie Mu-Metall abgeschirmt werden.

Mu-Metall, eine weichmagnetische Eisen-Nickel-Legierung.

Materialien mit hoher Permeabilität haben einen niedrigen magnetischen

Widerstand ($R_m = l_m / (\mu_0 \mu_r A)$), daher konzentriert sich fast

der gesamte magnetische Fluss im Mu-Metall. Diese Materialien kommen aber selten in Kompaktgeräten vor, die Absorption von Magnetfelder muss aber trotzdem ein Augenmerk bei der Entwicklung geschenkt werden.