2.4 GHz Bluetooth Low Energie Antenne

**Bachelorarbeit**

im Studiengang  
Elektrotechnik

vorgelegt von

**Marcel Erismann**Matrikelnummer 10-461-671

am 04. Januar 2016   
an der Hochschule für Technik und Architektur

Betreuer/in: Prof. Marcel Joss  
Experte/in: Erich Lerch

# 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 „Bluethooth 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 ein 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 Xccel, war das xxx Konzept am vielversprechendsten. Dieses wurde im Antennenentwicklungsprozess genauer untersucht und mögliche Designvarianten für den Einbau in die Flytec „Connect 1“ Geräteserie untersucht. Mit dem Ziel eine möglichst opimales Abstrahlverhalten zu finden.

# Summery

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 2

Summery 2

Inhaltsverzeichnis 3

Abbildungsverzeichnis 5

Tabellenverzeichnis 5

Abkürzungsverzeichnis 6

Vorwort 7

1 Einleitung 8

1.1 Ausgangslage 8

1.2 Problematik 9

1.3 Fragestellung 9

1.4 Ziel der Arbeit 9

1.5 Methodik 9

1.6 Aufbau der Arbeit 10

2 Theorie 11

2.1 Elementare Strahler 11

2.1.1 Hertzscher Dipol 11

2.1.2 Fitzgeraldscher Dipol 12

2.1.3 Die Dipol Antenne 12

2.2 Systemsicht 15

2.3 Speisung 15

2.3.1 Quelle 15

2.3.2 Zuleitung 15

2.4 Anforderungen 15

2.5 Analyse mit bekannten Modellen 15

2.6 Neue Design Ansätze 15

3 Implementierung 16

3.1 bala 16

3.2 blub 16

3.3 bloo 16

3.4 bliib 16

4 Test 17

5 Diskussion 18

6 Projektmanagement 19

7 Referenzen 20

Anhang A: Aufgabenstellung 21

Anhang B: Bewertungskriterien 22

Glossar 23

Stichwortverzeichnis 24

# Abbildungsverzeichnis

# Tabellenverzeichnis

# Abkürzungsverzeichnis

# Vorwort

Falls es sowas geben wird

# 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 teilweise 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 Oberschenkel getragen und positioniert werden. Die Informationen werden auf einem berührungssensitiven Anzeige dem Piloten zur Verfügung gestellt.

In dieser Arbeit soll für die neue Fluginstrumentenserie „Connect 1“ eine Kompaktantenne entwickelt werden, welche im Rahmen des „Near Pilot Netzwerk“ zur Anwendung kommen soll. Mit dem Ziel in Zukunft die Geräte der „Connect 1“ Serie über eine Bluetooth-Verbindung mit einem Smartphone zu koppeln. Initial wird die Ausgangslage dokumentiert und das bisherige Antennensystem beschrieben. In einem weiteren Schritt wird die Theorie der Kompaktantennen erarbeitet, um für das Abstrahlverhalten besser 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 „Connect 1“ der Firma Flytec AG optimiert. Die Simulationen wiederum werden mit der Theorie verglichen. Abschliessend soll ein Fazit gezogen und weitere Entwicklungsmöglichkeiten vorgeschlagen werden.

## Ausgangslage

Die Firma Flytec vernetzt Sensoren und Fluginstrumente drahtlos mit einem „near pilot network“. Ihre Fluginstrumente stellen für die Piloten von Tuchfliegeren ein grosse Hilfe dar. Die Navigation in der Luft stellte selbst 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

Bestandteil dieser Arbeit ist das Entwickeln einer 2.4 GHz Bluetooth Antenne. 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 sowohl von der Wahl der Antennen sowie der Positionierung abhängig. Es soll eine möglichst optimale symmetrisch gespiesesnes Antennenkonzept für die Bluetoothverbindung erarbeitet werden. Das heisst auf die bis anhin verwendeten Baluns soll in Zukunft verzichtet werden.

## Fragestellung

Für ein Fluginstrument der „Connect 1“ 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 über das Smartphone 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 Xccel 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 über das erarbeitete Funktionsmuster soll den zukünftigen Einsatz in der „Connect 1“ darlegen.

## Ziel 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 lassen.

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 von Texas Instruments 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.

## 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 AG 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 Engeneeringmodels

## Aufbau der Arbeit

.[[1]](#footnote-1)

# Theorie

## Elementare Strahler

Es gibt zwei elementare Strahler. Der eine stellt eine E Feld Antenne dar, der andere eine H Feld Antenne. Die beiden elementaren Strahler 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 ein Strom mit der komplexen Amplitude I und eine räumlich konstanten Stromverteilung, die zeitlich sinusförmig schwingt, annehmen. Es stellt sich einen kurzen Stromfaden ein, dessen Stromrichtung von der Polarisierung der Dipole abhängt und somit mit die Richtung wechselt.

Der hertzsche Dipol bildet den elementare Elektrischendipol, man kann ihn als sehr kurze Stabantenne vorstellen. Der Betrag des Dipolmoments eines Hertzschendipos ist als p=Q dl beschrieben. Der Scheitelwert des Stromes i (i dach) oszilliert mit der Kreisfrequenz kleine omega .

P(t)=pejwt = Q dl exp(jwt) = i dl/jw exp(jwt)

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 in Phase. Dabei können das E und H Feld als ebene Welle betrachtet werden. Die allgemeine Formel für die Feldverteilung laut:

Formel:

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:

### Fitzgeraldscher Dipol

Eine unendlich dünne Leiterschleife die auf der ganzen Länge die selbe Stromverteilung besitz, wird Fitzgeraldscher Dipol genannt. Dieser Dipol ist das Gegenstück zum Hertzschen Dipol und stellt somit den zweiten der beiden elementaren Strahler dar. Die Leiterschleife ist oft in der xy Ebene angeordnet. Wenn der Hertzsche 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:

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

Das Fernfeld kann wie folgt beschrieben werden:

Formel:

Die beiden elementaren Strahler 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.

Die Dipolantenne und die Rahmen Antenne sind den beiden Elementaren Strahleren nachempfunden und sollen im nächsten Abschnitt genauer betrachtet werden.

### Die Dipol Antenne

Der zentral gespeist Dipol besteht meist aus runden Leiterstäben mit dem Durchmesser d die nebeneinander liegen so, dass in der Mitte der beiden Stäbe eine kleine Lücke entsteht. Die gesamte Länge der beiden Stäbe entspricht 2l>>d. Wird eine Spannung wird in der Lücke zwischen den beiden Stäbe angelegt, kommt es zu einer Stromverteilung über die Länge der beiden Stäbe. Oft wird die Spannung mit einer 2 Draht Leitung, diese wird auch Transmission Line genannt, zwischen den Leiterstäben angebracht. Die anschliessende Stromverteilung über die beiden runden Leiterstäbe ist der Ursprung der Wellenausbreitung. In erster Näherung kann die sich vom der Speisestelle ausbreitende Wellenausbreitung als richtugnsunabhänige Kugelwelle betrachtete werden.

E^j(wt-kr)/4pimu^-1 r

Ellito:

Die Stromausbreitung in deiner Dipol Stabantenne entspricht einer Stromverteilung einer am Ende offenen Zweidrahtleitung. Das offene Ende der Leitung führt zur einer Reflexion der zuführenden Welle in die umgekehrte Richtung und somit zu einer stehenden Welle. Stromführende Elemente die nahe beieinander liegen, der Amplituden gleich aber gegenläufig sind, strahlen nur gering, das sind genau die Eigenschaften einer guten Zweidrahtleitung.

Als Näherung für die Stromverteilung soll folgendes gelten:

I(x,t) =Imsin([k(l-x)])exp(jwt)

Bei einem Dipol mit dem Durchmesser d<<<Lambda wird der Dipol zu einem dünnen Stromfaden und der Leiter kann JdV mit Idl als Stromelement ersetzen. Die Summation der Elementardipole kann dann als Quelle betrachtet werden.

Imsin(k(l-dz))

Die Gewichtungsfunktion dieser Summe von Elementardipole die alle in der z Achse liegen ist:

A(phi)= 0

A(theta)=elliot Formel 2.6 oder Joss EMANT 122.

Es sollen zwei Fälle genauer betrachtet werden.

1. der Halbwellendipol mit 2l= Lambda/2
2. der kurze Dipol mit 2l<<Lambda

#### Lambda/2 Dipol Halbwellendipol

Der Lambda/2 Dipol ist eine der wichtigsten Antennen. Über die Gewichtungsfunktion lässt sich auf das Fernfeldverhalten schliessen.

E(theta)= Ellito 2.8

E(phi) = Ellito 2.9

Die Feldverteilung kann in der 2 Dimensionalen Polar Form oder in einer 3 Dimensionalen Feldverteilung dargestellt werden.

Die nachfolgende Grafik zeigt eine E Feldverteilung als Schnitt durch die xz Ebene.

Bild

Dargestellt ist ein Lambda/2 Dipol der in z Richtung aufgerichtet ist. Es ist zu erkennen, dass bei theta 0 Grad und 180 Grad kein elektrisches Feld abgestrahlt wird. Stellt man sich die Grafik als um eine um phi von 0 Grad bis 360 Grad rotierende Scheibe vor, so kommt die bekannte Doughnut Form zum Vorschein.

Die von theta und phi abhängige Leitung ist gegeben durch:

P(theta,phi)= elliot2.10

Durch Lösung des Doppelintegrals

Elliot Seite 63

Erhält man eine nummerische Lösung

Prad=0.609 (nIm^2)/(2pi)

Wie die obere Grafik ganz gut zeitgt ist die maximale Feldausbreitung auf höhe der Einspeisestelle bei theta = 90 Grad, denn der sin(90°) entspricht 1.

Der maximale Richtwert aus dem englischen als directivity bekannt erhält man idem die Abgestrahlte Leitung mit einem isotropen Kugelstrahler verglichen wird.

Dmax=1.64 nach Ellito 2.12

Bei l=Lambda/4 ist der Scheitwert des Antennenstroms, beim Einspeisepunkt, dem Zentrum des Dipol bei z= 0, Im. Somit kann gesagt werden, dass die Zuleitung bringt eine Leistung von

Elliot 2.14

Der Strahlungswiderstand oder auch Rrad genannt kann im Fall des Labda/2 Dipol nummerisch als 73 Ohm.

Elliot 2.14.

vereinfacht werden.

#### Der kurze Dipol mit 2l<<Lambda

Die Therme cos(kl\*cos(theta)) und cos(kl) aus der Gewichtungsform des Lambda/2 Dipol können mit einer Reihe angenähert werden sofern kl klein ist.

Ellito 2.15

Der Eingangsstrom eines kurzen Dipol ist gegeben durch:

Ellito 2.16

Sogar für kleine Längen wie 2l = Lambda/4 kann ohne grossen Fehler die Gewichtingsfunktion als

Ellito 2.17

angenommen werden.

Wie beim Lambda/2 Dipol findet man bei einem kurzen Dipol ein vertikal polarisiertetes E Feld. Das Feld ist etwas breiter aber ebenfalls doughnutförmig. Die Impedanz des kurzen Dipol ändert sich jedoch drastisch gegenüber dem Lambda/2 Dipol. Und mit der Impdanz ist auch die winkelabhänige Leistungsdichte wie folgt gegeben:

Ellito 2.18

Die abgestrahlte Leitung eines kurzen Dipol kann mit

Ellito 2.19

Die aus der abgstrhalten Leitung ergebenden maximale Richtwirkung eines kuzen Dipol wird auch mit einem isotophens Strahler verglichen und es ergibt D=1.5. Das ist nicht viel weniger als bei einem Lambda/2 Dipol.

Der Strahlungswiderstand kann mit der Umformung des Prad=1/2 I^2Rrad umgestellt werden. Man findet :

Rrad=20(piL/Lambda)^2

Dabei wird L als 2l und somit als länge der beiden Dipolarme angenommen.

Wenn ein Dipol sehr kurz wird, zum Beispiel 2l=Lambda/8 dann wird Rrad = 3 Ohm, dieser Wert ist merklich kleiner als die 73 Ohm die für einen Lambda/2 Dipol gefunden wurden. Der Effekt auf den reaktiven Anteil der Eingangsimpedanz ist noch dramatischer. Für einen endlich dünnen Dipol mit der Dicke d , ist die Reaktanz der Eingangsimpedanz eines 2l=Lambda/2 positiv. Die Reaktanz ist wenig unter Null wenn die 2l<Lambda/2 sind, aber wird der Dipol weiter gekürzt, so sinkt die Reaktanz sehr schnell immer mehr negativ. Im Fall, dass 2l=Lambda/8 ist, so sind Werte für X grösser als 1000 Ohm kapazitive keine Seltenheit.

### Loop Antenne

## Systemsicht

## Speisung

### Quelle

### Zuleitung

## Anforderungen

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 |
|  |  |  |  |

## Analyse mit bekannten Modellen

## Neue Design Ansätze

# Implementierung

## bala

## blub

## bloo

## bliib

# Test

# Diskussion

# Projektmanagement

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: Engeenieringmodel ist gefertigt und dokumentiert

# Referenzen

# Anhang A: Aufgabenstellung

# Anhang B: Bewertungskriterien

# Glossar

# Stichwortverzeichnis

1. [↑](#footnote-ref-1)