



Diplomarbeit

Empfangsstation für globales Satellitenbodenstationsnetzwerk SatNOGS

Ritter Gabriel und Metzler Jakob

Betreuer: König Christian

2024



Rankweil

Ritter Gabriel und Metzler Jakob

Empfangsstation für globales Satellitenbodenstationsnetzwerk SatNOGS

Diplomarbeit, 2024

Betreuer: König Christian

Höhere Technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt Rankweil

Elektronik und technische Informatik

Negrellistraße 50

6830 Rankweil

Rankweil

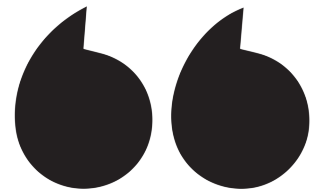


"In der Welt der drahtlosen Kommunikation sind Antennen die Stimme, die ohne Worte spricht, aber dennoch eine universelle Sprache vermittelt."

Unbekannt

"Von Anfang an übertraf Maxwells Theorie alle anderen an Eleganz und an der Vielzahl der Beziehungen zwischen den verschiedenen Phänomenen, die sie einschloss."

Heinrich Hertz



Eidesstattliche Erklärung über die Eigenständigkeit der Arbeit

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle sinngemäß und wörtlich übernommenen Textstellen aus fremden Quellen wurden kenntlich gemacht.

Rankweil, der [TT.MM.JJJJ]

Gabriel Ritter

Jakob Metzler

Abstract

Abstract (deutsch)

Ziel der Diplomarbeit ist es, eine funktionstüchtige Satelliten-Ground-Station aufzubauen, um mit Satelliten im Amateurfunkband, vor allem auch dem CubeSat des STS1, kommunizieren zu können.

Im ersten Schritt muss hierzu die Ground-Station selbst aufgebaut werden. Dazu gehören zum Beispiel die Demodulation, Low-Noise-Amplification und ein Software-Defined-Radio. Sobald die Ground-Station funktionstüchtig ist, sollen drei verschiedene Antennen-Typen gebaut und mit der Ground-Station betrieben werden, um den besten Antennen-Typ für den Empfang der CubeSat-Daten zu ermitteln. Die empfangenen Daten sollen weiters über eine grafische Benutzeroberfläche übersichtlich dargestellt werden können.

Im letzten Schritt werden die verschiedenen Antennen charakterisiert und Werte wie die Richtcharakteristik und der Gain ermittelt.

Abstract (english)

The goal of the thesis is to establish a functional satellite ground station to communicate with satellites in the amateur radio band, especially the CubeSat STS1.

In the first step, the ground station itself needs to be set up. This includes tasks such as demodulation, low-noise amplification, and a software-defined radio. Once the ground station is operational, three different types of antennas will be constructed and operated with the ground station to determine the best antenna type for receiving CubeSat data. The received data should be presented in a clear manner through a graphical user interface.

In the final step, the various antennas will be characterized, and values such as directional characteristics and gain will be determined.

Vorwort

Unsere Diplomarbeit nahm ihren Lauf als einige freundliche Mitglieder des TU-Wien-Space-Teams auf unsere Schule zu kamen und uns ein Projekt vorstellten: eine Bodenstation zum Empfang von Daten eines Satelliten der 2024 in den LEO befördert werden sollte - des STS1.

Dies weckte unser Interesse, bald fanden wir uns in einem Team wieder das hochmotiviert und bereit war loszulegen.

Im Rückblick stellte sich diese Entscheidung als eine sehr gute heraus, da wir im Prozess der Arbeit wertvolle Erfahrungen machten sowie ein wenig an der Oberfläche der Antennentechnik kratzen durften.

Inhaltsverzeichnis

1	Rationale	1
2	Einführung	3
2.1	SatNOGS-Netzwerk	3
2.2	grundlegende Antennentheorie	6
2.2.1	Antennenfeldzonen	6
2.2.2	Polarisation	6
2.2.3	Kenngrößen einer Antenne	8
2.2.4	Richtcharakteristik und Richtdiagramm	10
2.2.5	Einfluss der Erde auf das Richtdiagramm	11
2.2.6	Baluns	12
2.3	QHA (Quadrifilare Helixantenne)	13
2.3.1	Vorteile	13
2.3.2	Funktionsweise und charakteristische Eigenschaften . . .	13
2.4	Monofilare Helixantenne	13
3	Aufsetzen der Bodenstation	17
3.1	Code	17
3.2	Erklärung	17
4	Yaesu-G5500 Rotor	19
4.1	Azimut und Elevation	19
5	Quadrifilare Helix Antenne (QFH)	21
5.1	Funktionsweise	21
5.2	Design	21
5.3	Realisierung	21
5.4	Messungen	21
6	Helixantenne	23
6.1	Design	23
6.2	Realisierung	24

6.3	Anpassung	27
6.4	Tests	28
6.5	Erweiterung der Helixantenne als Array	28
6.5.1	Gerüst	28
6.5.2	Anpassung	28
6.5.3	Test	28
7	Mechanik	29
7.1	Schaltschrank	29
8	Discussion	31
8.1	Summary of findings	31
9	Schluss	33
10	Abkürzungsverzeichnis	35
11	Begleitprotokoll	37
12	Anhang	39
13	Perspektiven	41
14	Literaturverzeichnis	43
	Literatur	45

Rationale

Wieso ist das thema relevant, motivation für diese DA

Einführung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Antennen- und Leitertheorie gelegt sowie das SatNOGS Netzwerk näher erläutert.

2.1 SatNOGS-Netzwerk

Das SatNOGS-Netzwerk spielt eine zentrale Rolle in unserer Diplomarbeit und bietet hunderten Forschern, Amateurfunkern und Interessierten eine Plattform für verlässliche Kommunikation mit Satelliten.

Das, was SatNOGS zu so einer attraktiven Lösung macht, ist der Fakt dass die Bodenstation um den ganzen Globus verteilt sind. Der große Vorteil davon ist, dass der Empfang von Satellitendaten nun über alle verfügbaren Empfangsstationen laufen kann.

In Abbildung 2.1 wird die Topologie des SatNOGS-Netzwerkes abstrahiert dargestellt. Alle über das Netzwerk verfügbaren Bodenstationen sind mit SatNOGS-Servern verbunden. Auf diese Server kann über die Website bzw. API zugegriffen werden, welche die empfangenen Satellitendaten für alle Benutzer erreichbar macht.

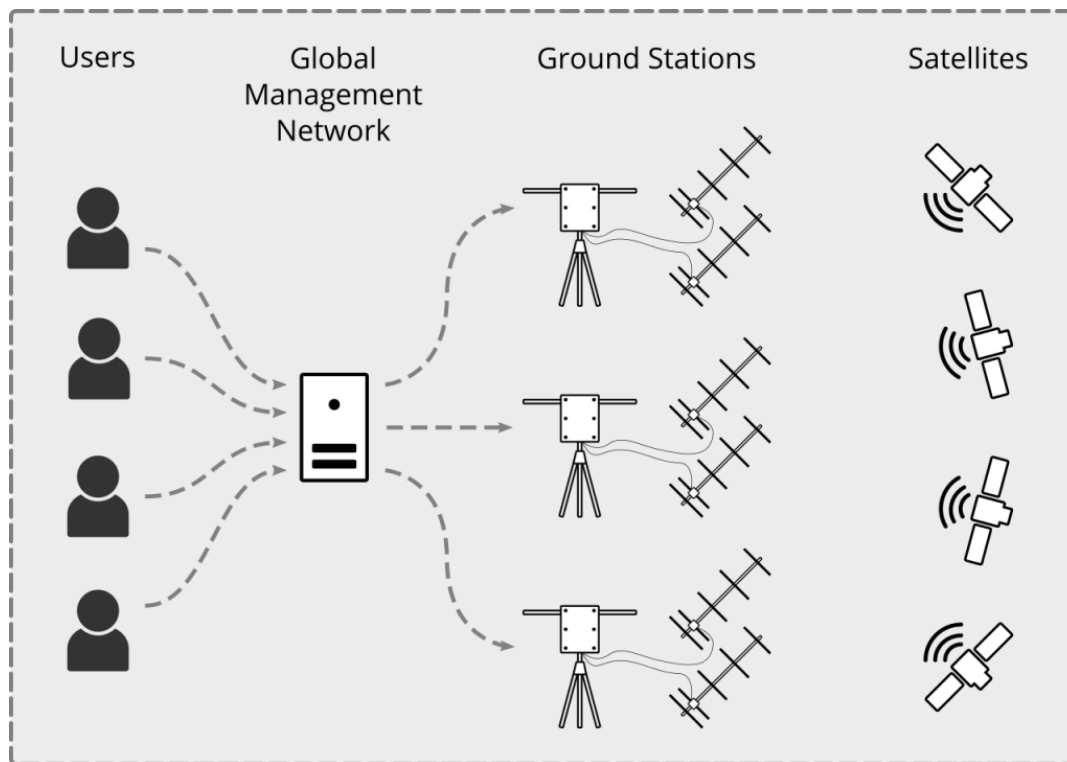


Abbildung 2.1: Erklärung des SatNOGS Netzwerkes

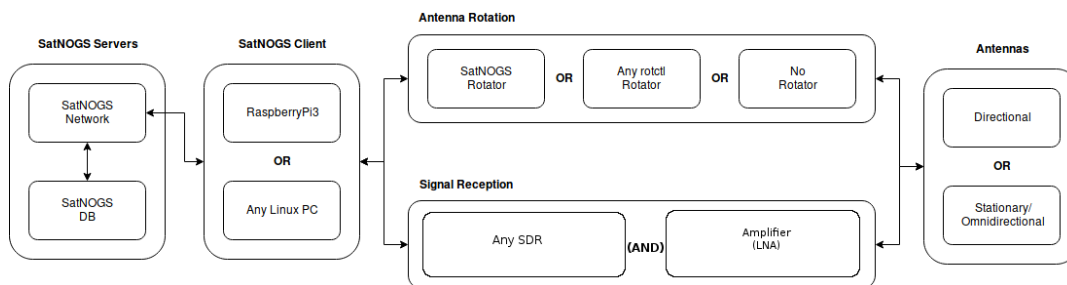


Abbildung 2.2: SatNOGS-Systemtopologie

Um näher auf den Ablauf des Datenempfangs und der benötigten Systemblöcke einzugehen wird auf Abbildung 2.2 verwiesen.

Zum Empfang von Daten kommen zwei Antennentypen infrage: Direktionale oder omnidirektionale Antennen. Eine direktionale Antenne folgt dem Verlauf des Satelliten. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass eine höhere Empfangsleistung erzielt, und somit klarere Daten empfangen werden, jedoch wird für solch ein Modell ein Rotator benötigt. Der Vorteil einer omnidirektionalen Antenne ist, dass kein teurer Rotator notwendig ist, allerdings können damit nur schwer brauchbare Daten empfangen werden.

Für gerichtete Antennen können verschiedene Rotatoren benutzt werden, unter anderem der SSatNOGS-Rotator sowie diverse Open-Source-Rotatoren und Rotatoren welche zum Verkauf stehen.

Zur Demodulation der Daten sind ein SDR (Software Defined Radio) sowie ein LNA (Low Noise Amplifier) notwendig. Das SDR übernimmt softwaretechnisch Aufgaben welche normalerweise von Hardware übernommen werden (Demodulation, Filter, Mixer, etc...). Der LNA, wie der Name schon andeutet, ist für die Verstärkung kleiner Signale mit besonderer Rauscharmut verantwortlich.

Die Aufgabe des SatNOGS Clients kann in der Regel von jedem Linux-PC oder RaspberryPi übernommen werden. Allerdings wird die Kompatibilität zwar für alle Linux-basierten PCs, jedoch nur für die RaspBerryPis Version 3, 3+ und 4 garantiert.

Der SatNOGS Client ist mit den Servern verbunden, der die Bodestation als solche im Netzwerk repräsentiert. Die Server unterhalten weiters eine Datenbank, welche Daten über Satelliten enthält, die mit den Empfangsstationen erreichbar sind.

2.2 grundlegende Antennentheorie

2.2.1 Antennenfeldzonen

Das von einer Antenne abgestrahlte Feld lässt sich in 3 verschiedene Regionen einteilen: das Nahfeld, das Übergangsfeld (Fresnel-Region) und das Fernfeld (Fraunhofer-Region).

Je nach Literatur erfolgt der Übergang zwischen den Feldzonen fließend. Eine Möglichkeit die Zonen einzuteilen ist in der nachfolgenden Tabelle einzusehen.

Nahfeld	Übergangsfeld	Fernfeld
$r < 0.2 \lambda$	$0.2 \leq r \leq 4\lambda$	$r > 0.4\lambda$

Das Nahfeld ist darin besonders, dass das elektrische und magnetische Feld mit unterschiedlichen Faktoren in Abhängigkeit der Entfernung abnehmen. Im Übergangsfeld nehmen das elektrische und magnetische Feld zwar mit dem gleichen Faktor ab, jedoch unterscheiden Sie sich noch in der Phase und Amplitude.

Im Gegensatz zum reaktiven Nahfeld wird beim Fernfeld Wirkleistung abgestrahlt. Hierbei sind die elektrische und magnetische Komponente der Welle in Phase und nehmen im gleichen Maß ab.

Da unsere Diplomarbeit einen Fokus auf die Satellitentechnik hat, ist für dieses Dokument nur das Fernfeld relevant.

2.2.2 Polarisation

Die Polarisationsart wird von der Ausrichtung des Vektors der elektrischen Feldstärke bestimmt. Es lässt sich zwischen drei verschiedenen Arten der Polarisation unterscheiden.

- Lineare Polarisation

- horizontale Polarisation

Eine horizontale Polarisation liegt vor, wenn die Feldlinien parallel zum Boden verlaufen.

- vertikale Polarisation

Die vertikale Polarisation entsteht, wenn die elektrischen Feldlinien senkrecht zum Erdboden stehen.

- Zirkulare Polarisation

Der Betrag des elektrischen Feldstärkevektors ist konstant. Der Feldstärkevektor rotiert in einer Spirale um den in Ausbreitungsrichtung weisenden Vektor. Ein Spiralumlauf ist nach der Wellenlänge λ vollendet.

- Elliptische Polarisation

Betrag sowie Richtung des elektrischen Feldstärkevektors ändern sich laufend. Bei der Rotation beschreibt der Vektor eine Ellipse.

Für diese Diplomarbeit liegt der Fokus auf der zirkularen Polarisation. Diese ist in der Satellitenkommunikationstechnik äußerst beliebt, da sie Immunität vor den störenden Effekten in der Ionosphäre, spezieller der Faraday Rotation, bieten.

Die Faraday Rotation ist ein Effekt, welcher elektromagnetische Strahlung "rotiert". Dies ist problematisch für linear polarisierte Strahlung, aber keines für zirkular polarisierte. Da die zirkulare Polarisation schon von ihrer Natur her eine rotierende elektromagnetische Welle mit sich bringt, ändert sich für diese nichts wenn sie in die Ionosphäre eintritt [4].

2.2.3 Kenngrößen einer Antenne

Antennengewinn

Als Antennengewinn wird die "bündelnde" Eigenschaft einer gerichteten Antenne im Vergleich zu einer Bezugsantenne bezeichnet. Hierbei ist die Vergleichsantenne meist ein Kugelstrahler.

Der Gewinn der Antenne berechnet sich mit dem Verhältnis der maximalen Empfangsleistung der gerichteten Antenne zu der des Kugelstrahlers. Wird als Bezugsantenne der Kugelstrahler verwendet, so wird die Empfangsleistung mit dem Index 'i' versehen um dies zu kennzeichnen.

$$G = \frac{P_{max}}{P_i} \quad (2.1)$$

Welligkeit

Die Welligkeit oder das Stehwellenverhältnis (SWR) gibt Aufschluss über die Spannungsverteilung auf der Speiseleitung und ist ein Maß für die Qualität der Anpassung. Sie beschreibt, wie groß der Anteil der reflektierten Wellen ist. Je schlechter die Anpassung, desto größer der Anteil der Wellen, welche reflektiert werden und desto größer das SWR.

$$SWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (2.2)$$

Wobei ρ der Reflexionsfaktor ist. Der Reflexionsfaktor kann auch der Streumatrix entnommen werden, welche

effektive Antennenfläche

Die effektive Antennenfläche ist das Verhältnis zwischen der Leistung welche von der Antenne aufgenommen und an eine angeschlossene Last abgegeben wird zu der Leistung welche die eingehende Welle liefert. Sie wird in m^2 angegeben.

Halbwertsbreite

Zur Bestimmung der Halbwertsbreite ist die Hauptkeule des Abstrahldiagramms einer Antenne von Relevanz. Die Halbwertsbreite ist hierbei der Öffnungswinkel, der geformt wird, wenn die Amplitude der Hauptkeule auf 50 Prozent oder um 3dB abgesunken ist.

Eingangsimpedanz

Die Eingangsimpedanz einer Antenne ist eine wichtige Größe in der Antennentechnik. Dies liegt daran, dass die Antenne meist auf ein Koaxialkabel mit einem Wellenwiderstand von 50Ω angepasst werden muss. Dies kann durch verschiedene Anpassungstechniken erreicht werden, wie z.B. ein LC-Anpassungsnetzwerk oder Übertragungsleitungen.

S11 Parameter

Der S11 Parameter beschreibt, wie viel eines Signals an dem Tor eines Vierpols reflektiert wird. Hierbei wird das Verhältnis zwischen hinlaufender Welle und rücklaufender Welle aufgestellt. Mithilfe dieses Parameters kann auf die Qualität der Impedanzanpassung geschlossen werden. Je niedriger der Wert, desto besser die Anpassung. Der S11 Parameter wird üblicherweise in dB angegeben MISSING REFERENCE.

2.2.4 Richtcharakteristik und Richtdiagramm

Die Richtcharakteristik beschreibt das Abstrahlverhalten einer Antenne. Hierbei wird die unter einem bestimmten Winkel (θ, ϕ) auftretende Feldstärke auf einen Maximalwert bezogen.

$$C(\theta, \phi) = \frac{E(\theta, \phi)}{E_{max}} \quad (2.3)$$

Wobei θ der Elevationswinkel (vertikal Winkel) und ϕ den Azimutwinkel (horizontaler Winkel) repräsentiert.

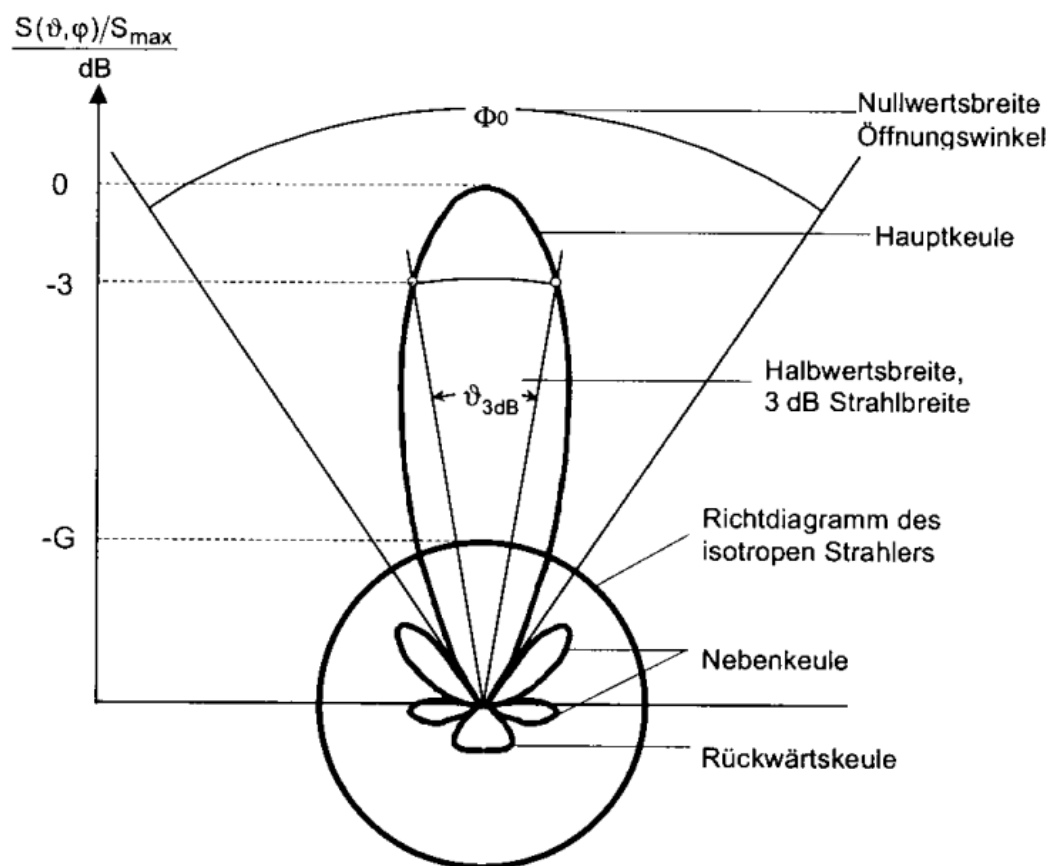


Abbildung 2.3: Richtdiagramm einer stark bündelnden Antenne

Hierbei ist zu bemerken dass in Abbildung 2.3 entgegen der üblichen Konvention das Richtdiagramm aus dem Verhältnis zwischen Strahlungsleistungsdichte und ihrem Maximalwert ergibt. Es ist gebräuchlich, das Diagramm auf den

Maximalwert zu normieren, sodass sich bei der maximalen Feldstärke 0 dB Dämpfung ergeben.

Der größte Teil der Leistung ist naheliegend in der Hauptkeule zu finden, während es nötig ist die Neben- und Rückwärtskeulen möglichst klein zu halten, um unnötige Abstrahlung in die Umgebung zu vermeiden. Die Halbwertsbreite der Hauptkeule ist der Wert ab dem die Leistungsdichte auf die Hälfte abgesunken ist.

Eine weitere wichtige Kenngröße bei Richtantennen ist das Vor-Rückwärtsverhältnis. Dies ist die Fähigkeit einer Richtantenne, Strahlung aus anderen Richtungen als der Hauptstrahlrichtung zu unterdrücken.

2.2.5 Einfluss der Erde auf das Richtdiagramm

Wird das Strahlungsdiagramm einer Antenne über dem Boden mit dem einer Antenne im Freiraum verglichen, lassen sich große Unterschiede erkennen. Der Boden dient als Reflektor wobei seine Reflexionseigenschaften von der Dielektrizitätskonstante sowie der Leitfähigkeit bestimmt werden.

Für die Reflexion elektromagnetischer Wellen am Erdboden trifft das Reflexionsgesetz zu, das bedeutet, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Hierbei kann es zu Überlagerungen zwischen den reflektierten und nicht reflektierten Wellen kommen und somit können destruktive und konstruktive Interferenzen entstehen.

Die Polarisierung der verwendeten Antenne spielt eine entscheidende Rolle bei der Reflexion. Bei einer vertikal polarisierten Antenne ist der Stromverlauf von Spiegelbild und Original gleichphasig. Bei einer horizontal polarisierten Antenne hingegen ist der Stromverlauf zwischen Reflexion und Original gegenphasig.

Der Abstand vom Boden spielt ebenfalls eine kritische Rolle und hat großen Einfluss auf das resultierende Richtdiagramm der Antenne. Wird beispielsweise ein Dipol $\frac{\lambda}{2}$ vom Boden entfernt aufgestellt, so verändert sich sein Richtdiagramm so sehr, dass aus der omnidirektionalen Antenne ein Strahler mit zwei Strahlungskeulen wird.

2.2.6 Baluns

Um Baluns zu verstehen muss vorerst der Unterschied zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Leitungen verstanden werden.

Eine unsymmetrische Leitung besteht aus einem Hauptleiter und einer Masseleitung, welche oft als Schild vor Störstrahlung verwendet wird. Jedoch ist das Kabel nicht nur gegen externe Strahlung geschützt, das Kabel selbst strahlt ebenfalls nicht. Das wohl bekannteste Beispiel hierfür sind Koaxialkabel. Eine symmetrische Leitung hingegen besitzt keinen Mantel und kann strahlen. Ein Beispiel für eine symmetrische Antenne ist eine QHA (Quadrifilare Helixantenne). Da symmetrische Antennen meist durch unsymmetrische Kabel (Koaxialkabel) betrieben werden, entsteht ein Problem. Es können Mantelwellen auf dem Koaxialkabel auftreten, was dazu führt, dass das Kabel strahlt. Außerdem wird dadurch das Abstrahlverhalten der Antenne beeinflusst, was die Funktion der Antenne beeinträchtigt. Um diese Nebeneffekte zu kompensieren werden Baluns eingesetzt.

Mantelwellensperre

Eine Mantelwellensperre ist wie folgt aufgebaut:

Sie unterdrückt Mantelwellen, welche negative Auswirkungen auf das Abstrahlverhalten der Antenne haben. Der Nachteil ist, dass sie schwach gegen statische Entladungen ist, da keine galvanische Isolierung existiert, wie beim Transformator. Sie ist für Anwendungen geeignet, in denen galvanische Isolierung nicht von allzu großer Relevanz ist.

Transformator

Der Transformator bietet mehrere Vorteile. Zum einen isoliert dieses Bauteil die Antenne galvanisch vom Rest des Netzwerkes, und zum anderen kann ein beliebiges Übersetzungsverhältnis gewählt werden. Der Transformator sollte gewählt werden, wenn ein guter Schutz gegen statische Entladungen gefordert

ist. Allerdings ist anzumerken, dass der Transformator keinen Schutz gegen Mantelwellen bietet.

2.3 QHA (Quadrifilare Helixantenne)

2.3.1 Vorteile

2.3.2 Funktionsweise und charakteristische Eigenschaften

2.4 Monofilare Helixantenne

Die Helixantenne ist die in der Satellitenkommunikationstechnik die am Weitesten verbreitete Antennenart [3]. Der Grund hierfür ist die Immunität der zirkularen Polarisierung gegenüber Faraday Rotation. Dieses Phänomen findet in der Ionosphäre statt MISSING REFERENCE und wurde in (REFERENZ) bereits näher erklärt.

Die Helixantenne hat weiters verschiedene Operationsmodi. Arbeitet die Antenne im Normal-Modus, so zeigt sie ein omnidirektionales Abstrahlverhalten, wobei sie senkrecht zur Achse der Antenne gleichmäßig in alle Richtungen strahlt. Dieser Betriebsmodus wird erreicht, sobald der Umfang einer Windung der Helix im Vergleich zu der Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{f}$ klein ist. Der zweite Modus der Wendelantenne ist der Axial-Modus. Befindet sich die Antenne in diesem Betriebsverhalten, so verändert sich die Richtung der Strahlung. Der Großteil der elektromagnetischen Strahlung wird nun entlang der Achse der Spirale abgegeben. Dieser Modus wird erreicht, sobald die Wellenlänge ungefähr gleich groß ist wie der Umfang einer Windung der Spirale [3].

Da die Wendelantenne über eine besonders große Bandbreite verfügt, eignet sie sich gut für den Nachbau. Hierbei sind der Durchmesser sowie die Steigung der

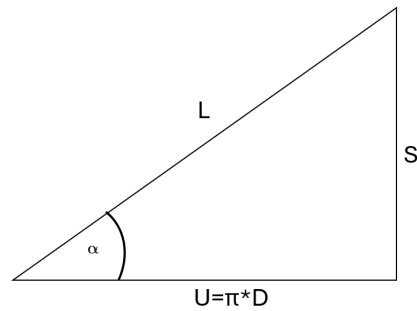
Spirale von ausschlaggebender Relevanz für die gewünschte Einsatzfrequenz. Der Durchmesser für eine Wendelantenne im Axial-Modus ist hierbei mit $D = \frac{\lambda}{\pi}$ definiert.

Ein Richtwert für die Steigung der Helix ergibt sich empirisch mit einem Steigungswinkel zwischen 12° und 14° [1]. Die Steigung der Spirale ist so wichtig für die Funktionalität der Antenne, da sie sich mit einem größeren Winkel eher wie ein Dipol verhält, und mit einem kleineren Winkel eher wie eine Ringantenne. REFERENZ

Die folgenden Bezeichnungen werden zur Beschreibung der Helix verwendet.

- D: Durchmesser der Helix
- S: Abstand zwischen den einzelnen Windungen
- U: Umfang der Helix
- α : Steigung der Helix
- L: Länge einer Windung
- n: Anzahl der Windungen
- Lges: Gesamtlänge der Helix
- d: Durchmesser des Leiters

Um den Winkel zu berechnen, lässt sich die aufgerollte Windung der Helix betrachten (Abbildung ??).



Hier lässt sich ein rechtwinkliges Dreieck erkennen. Die Ankathete ist hierbei der Umfang einer Windung und die Gegenkathete stellt den Abstand zwischen den einzelnen Drehungen dar. Somit lässt sich der Winkel α mit der Formel

$$\alpha = \arctan\left(\frac{S}{U}\right) \quad (2.4)$$

beschreiben. Ein weiterer vitaler Parameter für die Funktionalität der Antenne ist der Abstand zwischen den einzelnen Windungen. Dieser wird generell für $0,23\lambda$ als ideal angegeben. MISSING REFERENCE

Der Reflektor dient zur Verbesserung der Richtcharakteristik und kann verschiedene Formen annehmen. Er kann kreisförmig, viereckig oder auch trichterförmig sein. Für die Zwecke dieser Diplomarbeit wurde ein kreisförmiger Reflektor gewählt. Als passend wird hierbei ein Durchmesser zwischen $\frac{3\lambda}{4}$ und $\frac{4\lambda}{3}$ angesehen. Der Durchmesser des Leiters ist unkritisch für die Funktion der Antenne, allerdings wird als Richtwert ein Querschnitt von $0,005\lambda$ bis $0,05\lambda$ als passend betrachtet[2].

Nachfolgend sind die wichtigsten Gleichungen für die Berechnung der Parameter einer Helix-Antenne gegeben [2].

Bezeichnung	Formel
benötigte Kabellänge	$L = n * \sqrt{\lambda^2 + S^2}$
D	$D = \frac{\lambda}{\pi}$
Halbwertsbreite	$HPBW = \frac{52}{C * \sqrt{nS}}$
Gewinn	$G = 12 * C^2 n S$
Eingangsimpedanz	$Z = \frac{150}{\sqrt{C}}$
Effektive Antennenfläche	$A_e = \frac{D * \lambda^2}{4 * \pi}$

Anhand der Formel für den Antennengewinn lässt sich erkennen, dass dieser direkt proportional zur Anzahl an Windungen ist. Die Antennenwirkfläche beschreibt, welche Leistung dem elektromagnetischen Feld bei bekannter Leistungsdichte entnommen wird, wie bereits in QUERVERWEIS erwähnt MISSING REFERENCE.

Aufsetzen der Bodenstation

3.1 Code

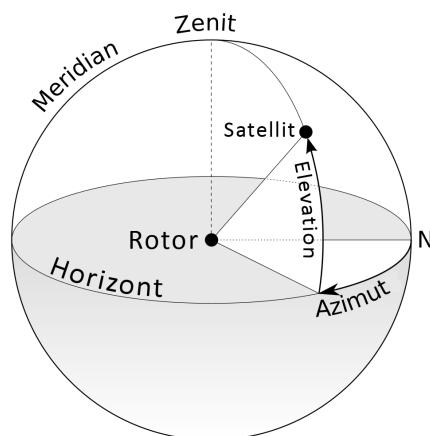
3.2 Erklärung

Yaesu-G5500 Rotor

Rotoren werden in der Antennentechnik eingesetzt, um die Kommunikation mit nicht-geostationären Satelliten zu ermöglichen, wobei Antennentypen mit hoher Richtwirkung verwendet werden (z.B. Helix-Antenne). In der Regel wird durch diese Methode eine höhere Verstärkung erzielt, als es mit Antennen möglich ist, die den gesamten Horizont abdecken und daher keine Nachführung erfordern.

4.1 Azimut und Elevation

Die Ausrichtung des Rotors und somit auch die der Antenne wird mithilfe der Angabe von zwei Winkel - Azimut und Elevation - im Gradmaß des astronomischen Horizont-Koordinatensystem angegeben, wobei das Azimut der auszurichtende Himmelsrichtung und die Elevation der vertikalen Ausrichtung entspricht. Beide Winkelscheitel sind dabei durch Position des Rotors definiert. Als Referenzschenkel für das Azimut dient die Linie vom Winkelscheitel nach Norden. Der Referenzschenkel für die Elevation bildet der Zenit am Ort des Rotors. Die Elevation entspricht somit dem Komplementärwinkel vom Referenzschenkel zur Linie welche den Winkelscheitel mit dem auszurichtenden Punkt verbindet.



https://de.wikipedia.org/wiki/Azimut#/media/Datei:Azimuth-Altitude_schematic.svg

Quadrifilare Helix Antenne (QFH)

5.1 Funktionsweise

5.2 Design

5.3 Realisierung

5.4 Messungen

Helixantenne

Die zweite aufgebaute Antenne ist eine monofilare Helixantenne. Dieser Antennentyp ist gerichtet, was bedeutet, dass sie in eine bestimmte Richtung einen höheren Antennengewinn im Vergleich zu anderen Richtungen hat. Sie ist eine der einfachsten Antennenarten um eine zirkulare Polarisierung zu erzielen. Kombiniert mit ihrer hohen Bandbreite macht sie das zu einer attraktiven Option zum Nachbau und zur Verwendung in der Satellitenkommunikation.

Für die in dieser Diplomarbeit konstruierte Helixantenne wurden die folgenden Parameter gewählt.

Parameter	Wert
Resonanzfrequenz	433MHz
Windungen	6
Abstand zwischen Windungen	$0,25\lambda$

6.1 Design

Durch den Einsatz im Freien muss die Helixantenne einige Anforderungen erfüllen. Beispielsweise dürfen wichtige Strukturelemente unter UV-Einwirkung nicht brüchig werden, es darf sich durch Regen kein Wasser stauen und sie muss starken Windböen standhalten.

Um die Helixantenne zu designen wurden Online-Rechner verwendet REFERENZEN. Folgende Ergebnisse konnten erhalten werden:

GRAFIK

Mithilfe dieser Werte konnte eine erste Näherung für die Antenne konstruiert werden.

GRAFIK

Diese konnte mithilfe von CENOS-Simulation-Suite simuliert werden. Für die Werte, welche aus dem Rechner erhalten wurden, resultierten folgende Ergebnisse.

S11-Parameter SWR Abstrahlverhalten 2D Abstrahlverhalten 3D

Um die Resonanzfrequenz der Helixantenne zu verschieben wurde der Durchmesser der Spirale verändert. Eine Resonanzfrequenz von 433MHz konnte mit einem Helix-Durchmesser von 270mm erreicht werden. Der Reflektor wurde aus der Theorie mit ca. $\frac{3\lambda}{4}$ festgelegt, was einem Durchmesser von 520mm entspricht.

Es ist wichtig anzumerken, dass der Steigungswinkel der Spirale hierbei ca. 11,5° beträgt. Dies bedeutet, dass die Steigung von dem relativ engen Idealbereich zwischen 12° und 14° abweicht.

6.2 Realisierung

Die Helixantenne besteht theoretisch aus nur zwei Bauteilen: der Spirale und dem Reflektor. Für die Simulation genügte dieses Modell, allerdings werden in der Realität Strukturelemente benötigt um diese zu befestigen.

BILD DER HELIXANTENNE

MATERIALLISTE

- PVC-Rohr
- Abstandhalter (Teflon bzw. PAS60)
- Rohrflansch
- Aluminiumrohr

- Aluminiumplatte

Das PVC-Rohr in das die Abstandhalter gesteckt sind, ist UV-stabilisiert. Wäre der Kunststoff nicht gegen UV-Strahlung geschützt, so würde dieser nach einer Zeit spröde und würde zusammenbrechen.

ZEICHNUNG DES ROHRES

Wie an der Zeichnung zu erkennen ist, wurden Löcher mit einem Abstand von [ABSTAND] und einem Durchmesser von 11mm gebohrt. Diese schaffen genug Platz für die Seitenelemente welche einen Durchmesser von 10mm aufweisen. Das Rohr besitzt weiters zwei Löcher am unteren Ende. Diese dienen dazu Das Rohr am Rohrflansch mithilfe von Schrauben zu montieren.

Die Abstandhalter sind hierbei jeweils mit 90° voneinander separiert um eine möglichst große Stabilität in allen Lagen zu ermöglichen. Das gewählte Material ist hierbei Teflon bzw. PTFE, da es eine sehr niedrige elektrische Permittivität besitzt. Das ϵ_r von PTFE ist rund 2,2, während das von Luft ca. 1 ist. Teflon ist zwar ein relativ weicher Kunststoff, allerdings erhöht die Anordnung der Seitenelemente die strukturelle Stabilität der Konstruktion MISSING REFERENCE. Da PTFE ein Hochleistungskunststoff ist, eignet dieser sich bestens für den Einsatz im Freien.

BILD VON OBEN

ZEICHNUNG ABSTANDHALTER

An der Zeichnung lässt sich erkennen, dass ein Außengewinde ungefähr bis zur Mitte der Teflonstange geschnitten ist. Der Stab wird mit dem Gewinde zuerst in die Löcher des PVC-Rohres gesteckt, damit dieser von vorne und hinten mit Muttern an das Rohr geschraubt werden kann.

BILD DER BEFESTIGUNG

Von der anderen Seite wird ein Loch mit einem Durchmesser von 5mm (M6 Gewinde) gebohrt. An dieses Kernloch werden UV-stabilisierte Rohrschellen montiert. Diese tolerieren Rohrdurchmesser von bis zu 18mm. Durch die

Verwendung von Rohrschellen vereinfacht sich die Montage der Spirale auf ein einfaches Einschnappen in die Rohrschellen.

BILD DER ROHRSCHELLEN

Außerdem lässt sich der Abstand der Spirale zum Reflektor verändern, wodurch eine Verbesserung der Richtcharakteristik bzw. des maximalen Antennengewinns erzielt werden könnte.

Der Rohrflansch bildet das Bindeelement zwischen dem PVC-Rohr und der Reflektorplatte. Der Rohrflansch hat einen Innendurchmesser von 51mm, und eine Wandstärke von 4mm.

BILD DES ROHRFLANSCHES

Er besteht aus einem Rohr, in welches zwei durchgehende Löcher mit einem Durchmesser von [DURCHMESSER] gebohrt wurden, und einer Platte in die ebenfalls zwei Löcher mit einem Durchmesser von [DURCHMESSER] gebohrt wurden. Die Platte und das Rohr werden aneinander geschweißt. Die Platte des Rohrflansches verbindet den Reflektor, und das Aluminiumrohr verbindet das PVC-Rohr.

Für den Reflektor wurde eine runde Aluminiumplatte gewählt. Für die reale Konstruktion wurden Löcher in den äußeren Rand der Platte gelasert, um den Luftwiderstand zu reduzieren. Diese müssen kleiner als $\frac{\lambda}{7}$ sein, um unerwünschte Störungen zu vermeiden.

BILD DER REFLEKTORPLATTE

In der Mitte des Reflektors werden zwei Löcher mit einem Durchmesser von [DURCHMESSER] gebohrt an denen der Rohrflansch befestigt wird.

Die Helix wurde real ebenso gebogen wie in der Simulation. Es wurde ein Aluminiumrohr mit einem Außendurchmesser von 18mm und einer Wandstärke von 2mm verwendet. Das Rohr hat eine Länge von [LÄNGE] und wurde zu einer Spirale gebogen, welche einen Durchmesser von 270mm, eine Höhe von [HÖHE] und konsequent eine Steigung von $11,5^\circ$ oder einen Abstand zwischen den Windungen von 172,5mm hat.

BILD DER HELIX

Um die Helixantenne wasserdicht zu gestalten wurden kurze Aluminiumrundlinge auf das Helixrohr geschweißt. Am unteren Ende der Helix, an der der Innenleiter des Koaxialkabels befestigt wird, wurde ein Gewinde in die Metallplatte geschnitten.

BILD DES RUNDLINGS

Mithilfe dieses Gewindes kann ein Kabel mithilfe eines Ringkabelschuhs und einer Schraube montiert werden.

Um die PVC-Rohre wasserdicht zu gestalten wurden Abdeckungen 3D-gedruckt. Diese wurden mithilfe des Filaments DuraPro ASA gedruckt. Dieses Filament besitzt UV- sowie Wetterfestigkeit, was es zu einer guten Option für dieses Anwendungsgebiet macht.

BILD DER ABDECKUNG

Der Anschluss für das Koaxialkabel (BNC-Buchse) wurde nach der Lieferung der einzelnen Bauteile montiert. Er wurde direkt unter dem Ende der Helix platziert.

Aufbau (Teflon Abstandhalter, PVC-Rohr, Spirale, Reflektor) Fusion Modelle, Zeichnungen

Spirale gebogen, Reflektor gelasert, UV-stabilisiertes PVC-Rohr, Befestigungsmethode, Anpassstreifen?, Verschlüsse (3D-Druck), BNC-Buchse, Befestigung des Kabels an der Helix, Befestigung des PVC-Rohrs am Reflektor

6.3 Anpassung

Um eine einzelne Helixantenne anzupassen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine weit verbreitete Option ist es, einen entsprechend dimensionierten Blechstreifen mit einer Länge von $\frac{\lambda}{4}$ entlang des unteren Endes der Helix zu

montieren. Dieser agiert als Resonanztransformator und soll die Impedanz der Antenne auf einen Wert von 50Ω senken.

Da die Höhe der Helix variabel ist, lässt sich überprüfen ob der Abstand der Helix zum Reflektor von Relevanz für eine erfolgreiche Anpassung ist.

6.4 Tests

Tests im Freien, Messungen an Satelliten

6.5 Erweiterung der Helixantenne als Array

Nun wird die Helixantenne durch drei weitere, identische, Helixantennen erweitert, welche zusammen ein Array bilden. Hierbei ist der Abstand zwischen den einzelnen Antennen

6.5.1 Gerüst

effektive apertur, Fusion Modelle, Zeichnungen

6.5.2 Anpassung

6.5.3 Test

Mechanik

7.1 Schaltschrank

Discussion

8.1 Summary of findings

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muß keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Schluss

10

Abkürzungsverzeichnis

Begleitprotokoll

11

Das hier ist der zweite Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muß keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Und nun folgt – ob man es glaubt oder nicht – der dritte Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muß keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Perspektiven

13

konischer Reflektor...

Literatur

- [1] *Helical Antenna (Helix)*. URL: <https://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/helix.php>.
- [2] John D Kraus und Ronald J Marhefka. *Antenna for all applications*. McGraw-Hill, 2002.
- [3] Zoran Blazevic und Maja Skiljo. *Helical Antennas in Satellite Radio Channel*.
- [4] Iida Takashi und Wakana Hiromitsu. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 3. Aufl. 2003. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/faraday-effect> (besucht am 24.02.2024).