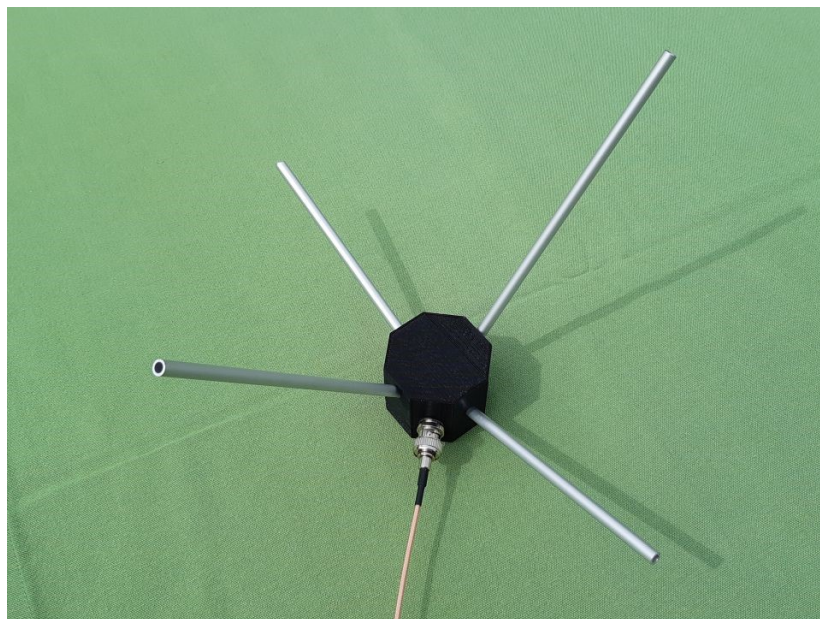


Easy Turnstile - Antenne für den Satellitenfunk

***Sehr einfach zu bauende, zirkular
polarisierte Antenne für das 70 cm Band***



*Christoph Schwärzler, OE1CGS
Juni 2021*

Abstract

It cannot get any simpler than that! This document deals with a very easy to build antenna, specialized for LEO satellite communication on the 70 cm band.

For several reasons, this type of communication is favored by circular polarized antennas, either with constant satellite tracking or homogenous gain. Typical antennas of the later type are crossed dipoles, often called turnstile antennas. Unfortunately, these antennas typically require special feedlines and care during building.

The special type of turnstile antenna dealt with in this document avoids these issues by a clever combination of impedances. Based on a 3D-printed central part¹, this antenna can be built in about an hour with parts, predominantly available at your favorite hardware store for little money.

The antenna was designed in EZNEC and optimized in full scale. Details and building instructions are given in this document.

Zusammenfassung

Einfacher geht es nicht mehr! Dieser Artikel beschreibt eine sehr einfach zu bauende Antenne, die insbesondere für die Kommunikation auf dem 70 cm Band über umlaufende Satelliten konzipiert ist.

Für Satellitenkommunikation werden aus verschiedenen Gründen vorzugsweise zirkular polarisierte Antennen entweder mit Nachführung und hoher Richtwirkung oder mit gleichmäßiger Abstrahlung benutzt. Ein typischer Vertreter der letztgenannten sind gekreuzte Dipole (Turnstile), die in der üblichen Form jedoch mit einer speziellen Signalzuführung gebaut werden müssen.

Die hier beschriebene Antennenform vermeidet durch den geschickten Einsatz verschiedener Impedanzen diese Schwierigkeiten und ist daher bei Vorliegen des 3D-gedruckten Zentralteils¹ in rund einer Stunde selbst zu bauen. Die meisten der benötigten Teile sind um wenige Euro im nächsten Baumarkt erhältlich.

Die Antenne wurde in EZNEC² entworfen und in der Praxis optimiert. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Antennenparameter findet sich im Artikel.

1.) Motivation

Der Funkverkehr über Satelliten geschieht häufig im Mode-J oder Mode-B, d.h. mit einem Uplink zum Repeater im Satelliten im 2m Band und einem Downlink im 70 cm Band oder umgekehrt. Die benutzten Frequenzen im 70 cm Band liegen dabei meist nahe bei 437 MHz.

Obwohl für den Satellitenverkehr leistungsmäßig bereits Handfunkgeräte (1 bis 5 W) ausreichen, sind die standardmäßig mitgelieferten Antennen („Gummiwurst“) bestenfalls für die ersten Hörversuche geeignet. Fallweise werden in der Literatur für diesen Zweck optional erhältliche, längere und aufschraubbare Vertikalstrahler empfohlen, aber auch diese sind in der Handhabung und im Ergebnis meist nicht sehr befriedigend. Exkurs: Mit derartigen Antennen nie direkt auf den Satelliten zielen, sondern in einem flachen Winkel abwärtsrichten. Das bietet noch die beste Chance auf einen Empfang.

Sehr viel besser geeignet sind Antennen, die einen hohen Gewinn aufweisen, womit sofort Yagi-Uda oder logarithmisch periodische Antennen ins Spiel kommen. Leider wird dieser Gewinn hier mit einer ausgeprägten Richtcharakteristik erkauft, sodass derartige Antennen zwingend dem Satelliten nachgeführt werden müssen, der in einer Zeitspanne von rund 10 Minuten von Horizont zu Horizont rast, da es sich bei diesen Satelliten vorwiegend um Objekte in niedrigen Umlaufbahnen (LEO) handelt. Wer die Kosten und den Aufwand einer automatischen Nachführung vermeiden will, muss diese Nachführung manuell vornehmen, was insbesondere dem Satelliten-Novizen zusätzlichen Stress verursacht.

Sehr beliebt sind daher auch Antennenformen, die zwar gegenüber den üblichen Mobilantennen einen höheren Gewinn aufweisen, diesen aber möglichst gleichmäßig über die Hemisphäre verteilen. Vertikalstrahler fallen hier durch, da sie in ihrem Zenit über ein ausgeprägtes Minimum verfügen. Gerade hier wäre aber die Distanz zum Satelliten am geringsten und die beste Signalqualität möglich. Eine niedrig aufgestellte, horizontale Dipolantenne ist hier viel besser, sie hat jedoch wiederum in der Verlängerungsrichtung ihrer Strahler ein azimuthales Minimum.

Durch den Einsatz zweier, rechtwinklig zueinander angeordneter Dipole wird hingegen eine weitgehend gleichmäßige Antennencharakteristik erzeugt. Diese Anordnung wird auch einfach als Kreuzdipol bezeichnet. In ihrer Grundform erzeugt sie eine Überlagerung zweier linear polarisierter elektromagnetischer Wellen.

Leider ist eine lineare Polarisation nur dann vernünftig, wenn auch die Gegenstation eine Antenne mit der gleichen Polarisationsrichtung benutzt. Genau dies ist aber beim Satellitenfunk nicht gewährleistet. Ein Grund liegt im Faraday-Effekt, der die Polarisationsrichtung beim Durchgang durch die Ionosphäre dreht. Das Ausmaß der Drehung ist dabei von der Frequenz und der Ionisierung abhängig und damit für praktische Zwecke unkontrollierbar. Ein zweiter, noch weniger kontrollierbarer Grund liegt darin, dass viele Klein- und Kleinstsatelliten über keine Stabilisierung verfügen und sich daher drehend und überschlagend durch den Orbit bewegen. Dementsprechend weisen auch ihre Antennen ständig in wechselnde Richtungen. Stimmen nun aber die Polarisationsrichtung von Sender und Empfänger nicht mehr überein, so kommt es zu teils massiven Signalverlusten.

Es kann nun gezeigt werden, dass unter diesen Umständen zirkular polarisierte Signale überlegen sind³. Treffen sie auf lineare Antennen, so ist zwar ein Verlust von 3 dB zu verzeichnen, dieser ist aber verschmerzbar und unabhängig von der Lage der Antennen zueinander. Treffen zwei (gleichlaufend) zirkular polarisierte Antennen aufeinander, wie es z.B. beim Funkkontakt über die lagestabilisierte ISS mit ihrer rechtszirkular polarisierten (RHCP) Antenne der Fall ist, ist überhaupt kein Verlust zu verzeichnen.

Dies wirft nun die Frage auf, wie zirkular polarisierte Wellen erzeugt werden können. Es gibt dafür Antennenformen wie die Lindenblatt Antenne oder die quadrifilare Helixantenne (QFH), bei welcher die elektromagnetische Welle mechanisch auf eine „Kreisbahn“ gezwungen wird, aber die Herstellung dieser Antennen ist aufwändig und sie sind aufgrund ihres filigranen Aufbaus praktisch nur für den ortsfixen Einsatz geeignet.

Als Alternative ist daher insbesondere bei Selbstbauern die Kreuzdipolantenne mit phasenversetzter Ankopplung, bekannter unter dem Namen „Turnstile“-Antenne beliebt (Abbildung 1). Hier wird einer der beiden Dipole direkt angeschlossen, während der zweite Dipol erst nach einer $\lambda/4$ - Umwegleitung angesteuert wird. Dadurch wird der zweite Dipol um 90° versetzt angeregt, was zusammen mit dem ersten Dipol eine zirkulare Polarisation ergibt. Die Länge der Umwegleitung muss unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors präzise an die Frequenz angepasst werden.

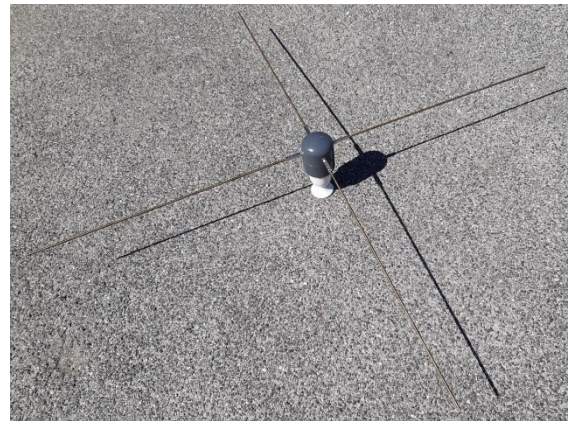


Bild 1: Klassische Turnstile Antenne für zirkulare Polarisation (hier ein Modell für NOAA-Wettersatelliten)

Zusätzlich wird der Bau dadurch erschwert, dass die beiden Dipole jeweils über eine Impedanz von rd. 72Ω reell verfügen und die Umwegleitung daher mit einem entsprechenden Kabel (meist: 75Ω wie z.B. RG-179) ausgeführt werden muss. Die Gesamtantenne weist daher eine reelle Impedanz von 36Ω auf. Die daraus resultierende Fehlanpassung muss entweder in Kauf genommen werden, oder durch eine zusätzliche Transformation bereinigt werden.

Es geht aber auch einfacher. Die 90° Phasenverschiebung lassen sich auch elektrisch durch geschickte Kombination von Strahlerimpedanzen erzeugen. Die Idee dahinter ist die Addition von komplex-konjugierten Größen, um in Summe eine reelle Impedanz zu erhalten. Frühe Arbeiten zu diesem Thema sind von Zack Lau, W1VT bekannt⁴ und auch L.B. Cebik, W4RNL widmet in einem Artikel⁵ einen Absatz dieser Spezialform, wenngleich noch ohne das Potential des 50Ω Spezialfalles zu beschreiben. Ein neuerer Beitrag handelt vom Bau von derartigen Antennen für den Einsatz bei der Meteor detektion⁶.

Werden zwei Strahler mit den konjugiert komplexen Impedanzen $50 + i \cdot 50 \Omega$ und $50 - i \cdot 50 \Omega$ parallel verbunden, so heben sich die Imaginärteile auf und es bleibt ein realer Anteil von 50Ω übrig (kein Druckfehler, es sind nicht etwa 25Ω , dahinter steckt die etwas aufwändigere Algebra mit komplexen Zahlen).

$$Z_i = 50 + i \cdot 50 \Omega \quad (1)$$

$$Z_k = 50 - i \cdot 50 \Omega \quad (2)$$

$$Z_G = Z_i || Z_k = 50 \Omega \quad (3)$$

Gleichzeitig sind die Abstrahlungen der beiden Strahler um 90° phasenverschoben, denn derjenige mit einem Imaginärteil der Impedanz von $+i50 \Omega$ (ich nenne ihn im Folgenden den induktiven

Strahler) weist eine Verschiebung des Stromes von -45° auf, der andere (der kapazitive Strahler) eine von $+45^\circ$. Diese Phasenverschiebung bewirkt eine zirkulare Polarisierung der Gesamtantenne. Es ist also weder eine Umwegleitung noch eine Impedanzanpassung notwendig.

2.) Modellierung

Bleibt die Frage, wie diese Strahler beschaffen sein müssen, um die gewünschten Impedanzen aufzuweisen. Bei einem gestreckten Dipol kann im Wesentlichen nur die Länge verändert werden (andere Größen wie Durchmesser und Bodenabstand erzeugen nicht die erforderlichen Impedanzänderungen). Damit lässt sich aber nur entweder der Realteil oder der Imaginärteil kontrollieren, nicht beide gemeinsam. Es wird ein zweiter Freiheitsgrad benötigt. Diesen bringt ein V-förmiger Strahler (Abbildung 2) mit sich, denn hier können unabhängig voneinander Winkel und Länge verändert werden. Der Winkel α wird im Folgenden immer von der Horizontalen zum Strahler gemessen.

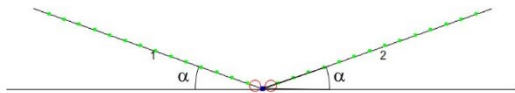


Bild 2: Bei der V-Form können sowohl die Strahlerlänge als auch der Winkel α variiert werden, um eine gewünschte Impedanz zu erhalten

Damit können beim Design einer V-Antenne – in gewissen Grenzen – sowohl der Real- als auch der Imaginärteil der Impedanz gezielt eingestellt werden. Zur Bestimmung der ungefähren Dimensionen habe ich eine V-Antenne in EZNEC modelliert. Das angenommene Strahlmaterial sind Aluminiumstäbe mit 6 mm Durchmesser (in der praktischen Ausführung sind es 6 mm Alurohre mit 1 mm Wanddicke). Um die Auswirkungen der Zuführung zu berücksichtigen und damit der späteren, praktisch realisierten Antenne näher zu kommen, wurden auch zusätzliche Modelle mit einem Abstand von 2 cm zwischen den Antennenschenkeln und mit horizontaler Verbindung („U-Antenne“) sowie weitere Zuführungsvarianten modelliert. Die grundlegenden Antennenmodelle stehen zum Download zur Verfügung⁷. Die Simulationen im angenommenen freien Raum wurden auch durch Analysen der Ergebnisse für perfekten und realen Boden bei einem Bodenabstand von 1,4 m ergänzt. Iterativ

wurden nun die Strahlerdimensionen so lange variiert, bis diese die gewünschten Impedanzen aufwiesen. Die Erkenntnisse aus diesem Prozess waren:

- Die ermittelten, optimalen Strahlerlängen der Varianten sind grob vergleichbar, sofern die Gesamtdistanz vom Antennenspeisepunkt herangezogen wird. Bei verwinkelter Zuführung müssen die Längen um rd. 4% erhöht werden.
- Die Trennung der Strahler unter Einbau einer horizontalen Zuführung führt zu einer Verkleinerung des optimalen Winkels um 3 bis 4° . Die Berücksichtigung eines realen Bodens führt gegenüber der Optimierung im freien Raum zu einer weiteren Verkleinerung des Winkels um rd. 1° .

Beide Punkte gelten sowohl für den induktiven als auch den kapazitiven Strahler.

Die Simulationen ermittelten eine optimale Gesamtlänge von rd. 180 mm und einen Erhebungswinkel von 52° für den induktiven Strahler und 150 mm sowie 18° für den kapazitiven Strahler.

Mit diesen Daten wurde im nächsten Schritt in EZNEC ein Modell der Gesamtantenne (Abbildung 3) erzeugt, wobei aus modelltechnischen Gründen die beiden Einzelantennen um 1 cm vertikal voneinander separiert werden mussten. Deren Verbindung wurde durch eine Transmissionsleitung (verlustlos und als sehr kurz angenommen) modelliert.

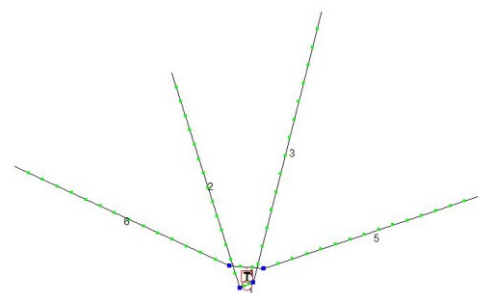


Bild 3: EZNEC-Modell der Turnstile Antenne mit konjugiert komplexen Impedanzen

Die Kombination zeigt den beabsichtigten Effekt und die simulierte Antenne weist die gewünschte Impedanz von 50Ω real auf.

Nunmehr konnte die Antenne rechnerisch mit einer klassischen Turnstile Antenne mit Umwegleitung

verglichen werden. Es war zu befürchten, dass die Verwendung von V-Stahlern, speziell jene mit einem relativ hohen Winkel von 52° zu deutlichen Gewinneinbußen führen würde. Die folgende Abbildung zeigt die azimuthalen Gewinne, jeweils bezogen auf den isotropen Strahler für die Erhebungswinkel von 30° und 60° . Zum Vergleich sind auch die Gewinne einer klassischen Turnstile-Antenne mit Umwegleitung eingetragen.

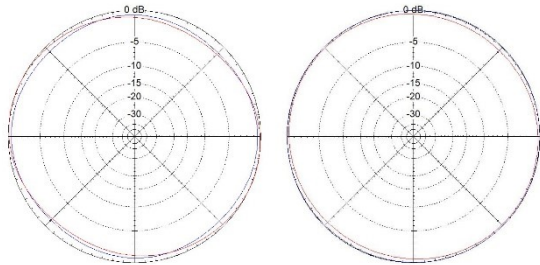


Bild 4: Vergleich der simulierten, azimuthalen Antennengewinne für Erhebungswinkel von 30° (links) und 60° (rechts).

In Abbildung 4 sind die Gewinne relativ zu einem isotropen Strahler dargestellt. Die blauen Linien stellen die Daten für die klassische Turnstile Antenne und die roten Linien für die Turnstile Antenne mit konjugiert komplexen Impedanzen dar.

Bei einer senkrechten Einstrahlung ist die konjugiert-komplexe Antennenform mit 1,56 dBi gegenüber der klassischen Turnstile mit 2,13 dBi im Nachteil. Insgesamt bleiben die Gewinne jedoch immer weniger als 1 dB hinter den entsprechenden Gewinnen einer klassischen Turnstile und sind bei manchen Abstrahlwinkeln sogar höher. Dies ist deutlich weniger als befürchtet und ein akzeptabler Kompromiss gegen den viel leichteren Aufbau bei Vorliegen des 3D-Druckteils.

Für diese relativen Betrachtungen wurden die Antennen ohne Berücksichtigung von Bodeneffekten („Free Space“) modelliert. Wie wir später noch sehen werden, verbessert die Gegenwart von Erdboden und insbesondere eines passend angebrachten Reflektors den Gewinn senkrecht nach oben noch deutlich, allerdings etwas zu Lasten der Eigenschaften bei geringer Elevation.

3.) Prototyp und Optimierung

Mit den rechnerisch ermittelten Daten wurde ein erster Prototyp angefertigt. Dieser wurde bereits mit der Absicht entworfen, das endgültige Design heimwerkerfreundlich zu gestalten. Daher kam bereits bei diesem Prototypen dem Fußteil eine entscheidende Rolle zu. So legt dieses die exakte Lage und Winkel der Strahler fest und bietet die Anschlussmöglichkeit in Form einer BNC-Buchse. Dieses Fußteil wurde mit einem CAD-Programm

entworfen und auf einem im Hobbybereich üblichen 3D-Drucker in FDM-Technik gefertigt. Damit waren die Erhebungswinkel auf 52° (induktiver Strahler) und 18° (kapazitiver Strahler) festgelegt.

Die Strahler in Form von Aluminiumrohren wurden etwas länger als berechnet angefertigt und aufgeschraubt. An der fertigen Antenne wurde nun direkt an der Antennenbuchse die Impedanz mit einem vektoriell arbeitenden Messgerät⁸ erfasst.

Tatsächlich kam bereits der erste Prototyp mit einer gemessenen Impedanz von $69,5 - i \cdot 3 \Omega$ dem Ziel recht nahe. Durch Versuch und Irrtum wurden nun die Strahlerlängen paarweise variiert, um die gewünschten 50Ω Impedanz zu erzielen. Es hat sich dabei bewährt, vor dem (irreversiblen) Kürzen eines Strahlers, eine M4 Schraube oben in den Strahler einzulegen. Diese passt perfekt in das Alurohr und verlängert den Strahler grob um 3 mm. Sie bringt zwar auch andere Effekte mit, aber für eine einfache Abschätzung der Wirkung des Kürzens (die dann natürlich in die andere Richtung geht) reicht es allemal. Etwas Aufmerksamkeit muss dabei der Umgebung gewidmet werden, denn diese beeinflusst die Antenne. Insbesondere metallische Gegenstände innerhalb eines Bereichs von bis zu 5 m rund um die Antenne ändern deren Charakteristik und Impedanz. Ich habe die praktische Optimierung daher im Freien auf einem Holzmöbel durchgeführt, dies war auch der spätere Aufstellungsort.

Mit dieser Technik gelang es, eine Gesamtimpedanz von $49 + i \cdot 3 \Omega$ zu erhalten. Das entspricht einem Stehwellenverhältnis von 1,07 an 50Ω , und ist daher völlig ausreichend für einen direkten Betrieb am Funkgerät ohne weitere Maßnahmen.

Diese Impedanz wurde mit den folgenden Strahlerlängen erzielt:

Induktiver Strahler:	170 mm
Kapazitiver Strahler:	115 mm

Diese Werte sind deutlich kürzer als die Simulationsergebnisse, es muss aber berücksichtigt werden, dass beim realen Aufbau etliche Zentimeter Zuführungen zu den Strahlern vorhanden sind, die selbstverständlich bereits Teil der strahlenden Antenne sind.

4.) Bau der Antenne

Der Bau dieser Antenne ist sehr einfach und sollte in etwas mehr als einer Stunde Arbeitszeit machbar sein. Die meisten der dafür benötigten Materialien (siehe Anhang Tabelle 1) sind im lokalen Baumarkt für wenige Euro erhältlich, einzig das kurze Stück Koaxialleitung, die Ferritkerne und die BNC-Buchse

müssen über den Elektronikteilhandel bezogen werden, sofern nichts passendes in der Bastelkiste herumliegt. Die kurzen Kupferleitungen 1,5 mm² habe ich ganz einfach aus Einziehdraht gewonnen, indem ich davon die Isolierung abzog und den Draht im Schraubstock geradebog.

Der 3D-Druck der beiden Teile gestaltet sich sehr einfach. Es sind keine Methoden zur Haftungsverbesserung oder Unterstützung überhängender Teile erforderlich. Ich habe die Teile aus PLA gefertigt mit mittlerer vertikaler Auflösung (0,2 mm) und aus einer 0,4 mm Düse gedruckt. Das größere Teil bildet den Körper, in welchem sämtliche Montagearbeiten erfolgen. Der kleinere Boden wird erst ganz am Schluss aufgesteckt und hält dann von selbst.

Vor der Montage muss der Körper etwas bearbeitet werden. Mit einem 5 mm Metallbohrer in einer Bohrmaschine müssen alle vier Montagelöcher für die Strahler nachgebohrt werden (vgl. Abbildung 5), damit später die Schrauben einfach montiert werden können.

Dann wird ein 6 mm Metallbohrer benutzt, um von Hand von der Außenseite her nur den jeweils vorderen Teil der Strahlerhalterungen zu säubern. Wichtig: Nur so weit arbeiten, dass der hintere Teil der Halterungen mit dem 5 mm Loch für die Schraube nicht aufgebohrt wird.

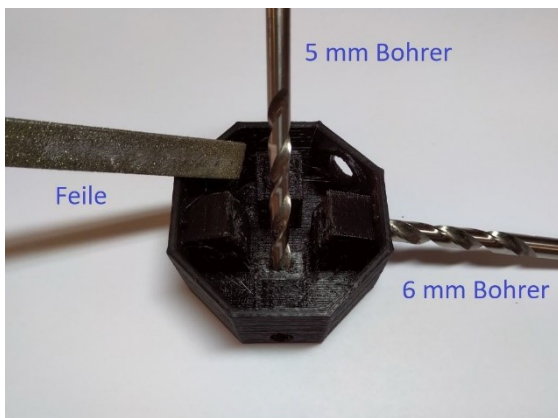


Bild 5: Nachbearbeiten des 3D-Druckteils für den Antennenkörper

Nun sollte sich an allen 4 Halterungen von der Innenseite des Körpers her eine M5-Schraube und von der Außenseite her das Aluminiumrohr einstecken lassen.

Eventuell kann auch mit einer Feile an der einen oder anderen Stelle etwas nachgearbeitet werden, dies ist aber oft nicht erforderlich.

Nun werden die Verbindungsleitungen zwischen den Strahlern hergestellt. Dazu wird ein 46 mm langes Stück Draht unter Zuhilfenahme einer

Flachzange von Hand um eine eingespannte M5-Schraube gebogen.

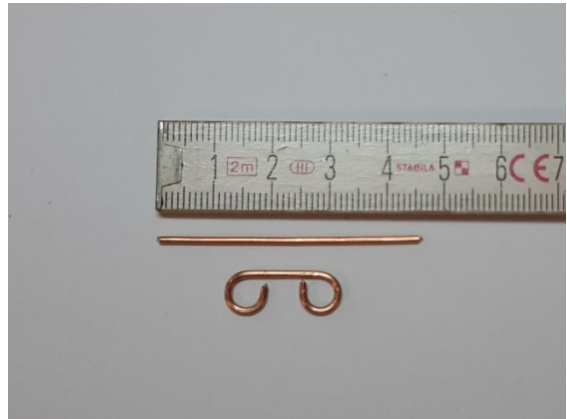


Bild 6: Draht und daraus gebogener Verbindungsbügel

Danach wird das andere Ende ebenfalls gebogen. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Details dazu.

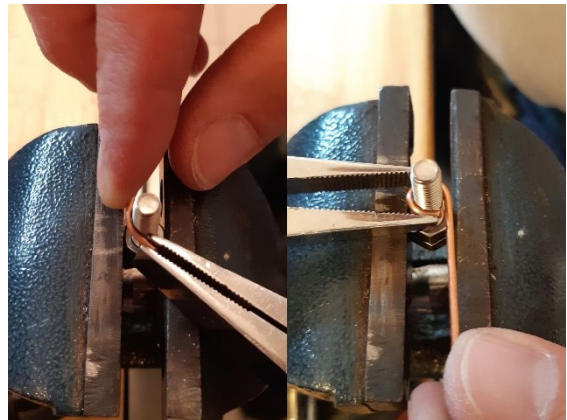


Bild 7: Herstellung des Drahtbügels. Linke Bildhälfte: Der Draht wird zu Beginn an einem Ende mit der Zange gehalten. Rechte Bildhälfte: Der Draht wird mit der Zange an der Schraube fixiert, während mit dem verbleibenden Draht der Drahtkreis geschlossen wird

Für die Antenne werden 2 derartige Verbindungsbügel benötigt.

Bei der Montage der Bügel muss unbedingt darauf geachtet werden, dass sie die richtigen Strahler miteinander verbinden, sonst würde sich die Polarisationsrichtung ändern. Dazu legt man den Körper so vor sich, dass die Öffnung für die Montage der BNC-Buchse zu einem schaut. In dieser Stellung werden die Bügel auf der linken und rechten Seite montiert. In Abbildung 9 ist die korrekte Montage zu sehen.

Nun werden die Muttern seitlich in die Strahlerhalterung eingesetzt. Hier hat sich eine spitze Pinzette mit der die Mutter innen und außen gehalten wird, sehr bewährt. Unter Umständen muss noch mit einem geeigneten Gegenstand etwas nachgedrückt werden. Bevor die Schrauben eingesetzt werden, wird auf diese zuerst die

Fächerscheibe aufgesetzt und die Schraube dann durch eine Biegung des Drahtbügels geführt. Dieser wird dabei so gelegt, dass die verbindende Seite zwischen den Biegungen oben liegt und später gut zugänglich ist. Um die Schraube durch die jeweils zweite Biegung zu führen, muss der Bügel mit einer Flachzange zuerst in Position vor dem jeweiligen Montageloch gebogen werden. Ist die Schraube durch, so sollte sie bald die Mutter greifen und diese in weiterer Folge so lange in die Strahlerhalterung ziehen, bis sie von der Seite nicht mehr zu sehen ist. Die Schraube wird schlussendlich mit sanftem Druck angezogen.

Wenn alle vier Schrauben mit den zwei Verbindungsbügeln montiert sind, erfolgt als nächstes die Montage der BNC-Buchse. Hier ist nur darauf zu achten, dass der Masseanschluss bei der Montage nach oben gerichtet wird und somit später gut zugänglich bleibt.

Nun wird das Koaxialkabel zwischen den Bügeln und der BNC-Buchse vorbereitet. Erfahrungsgemäß sollte die Bemaßung laut Abbildung 8 für ein RG 316 Kabel zielführend sein.

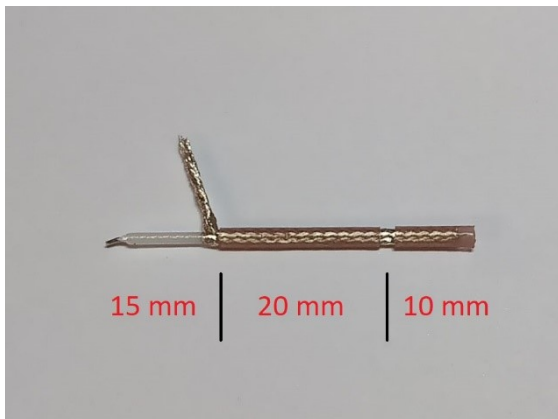


Bild 8: Vorbereitung des Koaxialkabels zur Verbindung von BNC-Buchse und Strahleranschlüssen

Es ist praktisch, wenn die äußere Isolierung auf der kürzeren Seite (rechts in Abbildung 8) vorerst noch auf dem Kabel verbleibt.

Die beiden Leiter der länger abisolierten Seite werden nun an die beiden Bügel gelötet, wobei es egal ist, welcher Leiter mit welchem Bügel verbunden wird. Da der Kupferdraht und die Schrauben viel Wärme ableiten, muss dazu ein leistungsfähiger Lötkolben verwendet werden.

Jetzt werden die Ferritkerne bis zur Teilung auf das Koaxialkabel gezogen. Sie müssen unbedingt mit einem Stück Schrumpfschlauch isoliert werden, um keinen Kontakt zwischen den beiden Seiten herzustellen. Gleichzeitig fixiert der Schrumpfschlauch die Kerne auf dem Kabel.

Der zuvor noch auf dem Kabel belassene Außenisolator wird nun entfernt, das Geflecht nach oben hin abgebogen und der Innenleiter mit dem Zentrum der BNC-Buchse verlötet. Nun den Masseanschluss der Buchse um rd. 90° nach unten biegen und den Außenleiter daran löten. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis.

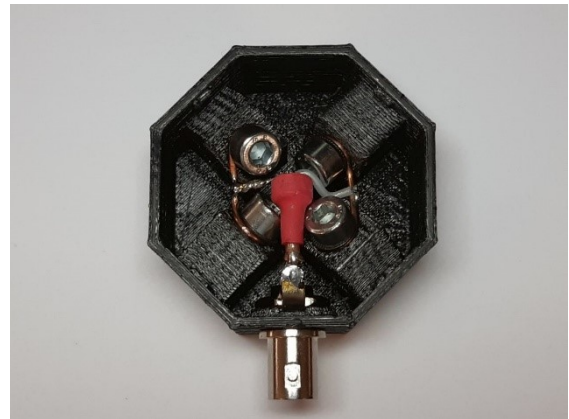


Bild 9: Fertig montierter Antennenkörper

Beim Aufsetzen des zweiten 3D-Druckteils, des Bodens, darauf achten, dass die Ausnehmung am Rand des Bodens sich über der BNC-Buchse befindet. Mit etwas Druck rastet der Boden im Körper ein und der Antennenfuß ist fertig.

Nun werden die vier Strahler aus dem Aluminiumrohr hergestellt. Zuerst werden sie möglichst millimetergenau auf Länge gesägt. Zwei Stücke auf 170 mm und zwei Stücke auf 115 mm. Die Enden etwas abfeilen, was sehr gut geht, wenn die Alurohre von einem Akkuschauber gedreht werden.

Mit einem Außendurchmesser von 6 mm passen die Rohre bereits in die vier Strahleraufnahmen im Antennenfuß, aber es müssen noch die Innengewinde geschnitten werden, um die Strahler elektrisch und mechanisch stabil mit dem Fußteil zu verbinden. Zuvor müssen die Innendurchmesser von 4 mm jeweils auf einer Seite des Strahlers auf 4,2 mm aufgebohrt werden, dem Ausgangsmaß für ein Standard M5 Innengewinde. Eine geeignete Flüssigkeit wie zum Beispiel Spiritus erleichtert das Bohren und folgende Gewindeschneiden.

Zum Abschluss werden die Strahler mit den Gewinden voran in den Antennenfuß eingeführt und dort verschraubt. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass die beiden längeren, induktiven Strahler in diejenigen gegenüberliegenden Löcher eingesetzt werden, die einen größeren Erhebungswinkel darstellen und die beiden kürzeren, kapazitiven Strahler in die beiden Löcher mit den geringeren Winkeln. Bei falscher Montage funktioniert die Antenne nicht und stellt eine

Impedanz von ca. 25Ω dar. Abbildung 10 zeigt die fertig aufgebaute Antenne.

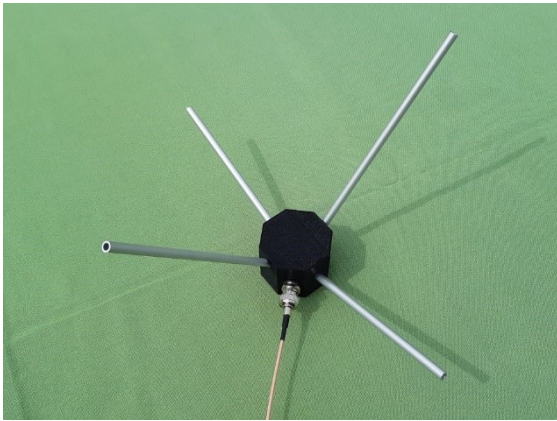


Bild 10: Die einsatzbereite Antenne

5.) Eigenschaften und Messungen

Neben der Impedanz ist natürlich der Antennengewinn als Qualitätskriterium bedeutend. Die in Abschnitt 2 beschriebenen Simulationen ließen ja eine relativ gleichmäßige Antennencharakteristik erwarten, dies galt es aber in der Praxis zu überprüfen. Auch sollte geklärt werden, wie die Antenne im Vergleich mit der Standard-Gummiwedel eines Handfunkgeräts abschneidet.

Bei der praktischen Erprobung wurde die Antenne über eine 1,4 m lange Leitung aus RG 174 an ein Handfunkgerät Icom IC-92D als Sender angeschlossen. Die Leitungs- und Anschlussdämpfung bewirkten dabei einen Verlust von etwas über 1 dB. Für Empfangszwecke überhaupt kein Problem, aber beim Einsatz als Sendeantenne und längerer Zuführung sollte die Verwendung eines Kabels mit geringerer Dämpfung bei VHF in Erwägung gezogen werden.

Als Messgerät für die Signalstärke wurde ein Spektrumanalysator TinySA mit einer kurzen Vertikalantenne benutzt. Die Messung erfolgte im Abstand von rd. 8-12 m, also bereits im Fernfeld, bei Erhöhungen von 30° und 60° . Die azimuthale Abhängigkeit wurde durch Verdrehung der Sendeantenne in Schritten von 45° ermittelt.

Trotz aller Anstrengungen sind diese Messungen natürlich nicht unter Laborbedingungen entstanden und deren Ergebnisse können daher keinen Anspruch auf Verlässlichkeit erfüllen. Es ging mir daher vielmehr um eine prinzipielle Brauchbarkeitsbeurteilung der Antenne und weniger um die exakte Bestimmung der Charakteristik. Bitte die folgenden Ergebnisse daher immer unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten.

Die Simulationen zu dieser Antenne lassen einen recht gleichmäßigen Gewinn in alle Himmels-

richtungen erwarten (Abbildung 4) mit maximalen Unterschieden von 3,4 dB bei 30° und 0,5 dB bei 60° Abstrahlungswinkel. Die maximal gemessenen Signalunterschiede waren 4,6 dB bei 30° und 4,9 dB bei 60° und somit teilweise deutlich höher als die berechneten. Zwischen den Elevationen wurden bei gleichem Azimuth Unterschiede bis zu 5,9 dB gemessen, wobei der Gewinn mit der Elevation zunimmt. Dennoch ist auch die gemessene Charakteristik homogen genug, um auch ohne Nachführung einen großen Teil der Überflüge abdecken zu können.

Spannend ist auch der Vergleich mit der mitgelieferten Antenne („Gummiwedel“) des Icom IC-92D. Bei dieser hängt die Signalstärke ganz wesentlich von der Ausrichtung ab. Bei 30° Elevation wurden Unterschiede bis zu 13 dB gemessen, bei 60° waren es noch 4 dB. Die zirkular polarisierte Antenne blieb bei 30° im schlechtesten Fall 3,0 dB hinter der Idealrichtung der Gummiwedel, im besten Fall hatte sie hingegen einen Vorteil von 14,6 dB gegenüber der Standardantenne zu verzeichnen. Bei 60° stand einem schlechtesten Wert von -1,5 dB ein bester Gewinn von +7,5 dB gegenüber.

Es ist also anzunehmen, dass die zirkular polarisierte Eigenbauantenne zumindest den gleichen Effekt wie die Gummiwedel hat, in den meisten Fällen diese aber übertrifft. Und dies, ohne während des Überflugs ständig auf die korrekte Ausrichtung achten zu müssen. Hörversuche haben diese Erwartung bestätigt.

Die Abstrahlung senkrecht nach oben kann noch deutlich gesteigert werden, wenn unter die Antenne ein Reflektor montiert wird. Dies kann im einfachsten Fall ein Stück Aluminiumfolie sein, die auf dem Tisch ausgelegt wird. Wichtig ist, dass die Antenne dann mit einem nichtleitenden Sockel, wie z.B. einem Plastikbecher um genau 80 mm gegenüber der Alufolie erhöht wird. Der Antennengewinn senkrecht nach oben wird dann um über 2 dB erhöht, derjenige bei 45° steigt um knapp 1 dB, aber bei niedrigeren Winkeln sinkt der Gewinn.

ANHANG A: Materialliste

Die folgende Materialliste soll als Hilfe bei der Suche nach den passenden Komponenten dienen. Die meisten Teile sind im lokalen Baumarkt erhältlich, die übrigen Bauteile müssen aus dem Elektronikhandel bezogen werden.

Materialliste
3D-Druckteile (Körper, Boden)
Aluminiumrohr
6 mm Außendurchmesser, 1 mm Wanddicke
2 Stk. 170 mm lang
2 Stk. 115 mm lang
4 Stk. Schraube M5x16mm, Inbus
4 Stk. Mutter M5
4 Stk. Fächerscheibe M5
BNC-Einbaubuchse
50 mm Koaxialkabel 50 Ω (z.B. RG 316)
Ferrit-Ringkerne od. -perle (z.B. 2 Stk. FT23-43)
Schrumpfschlauch für Ringkerne

Tabelle 1: Verwendete Bauteile

¹ Das Druckteil sorgt für die präzisen Winkel der V-Antennen, die mechanische Befestigung der Strahler und die Anspeisung. Es kann heruntergeladen werden unter: <https://www.thingiverse.com/thing:4883218>
Sollte kein 3D-Drucker zur Verfügung stehen, können kommerzielle und nichtkommerzielle (www.prusaprinters.org/world) Anbieter für den Ausdruck kontaktiert werden.

² Simulationssoftware für den Antennenbau, basierend auf der Momentenmethode: www.eznec.com

³ Siehe u.a.: <https://www.qsl.net/sv1bsx/antenna-pol/polarization.html>

⁴ Zack Lau, W1VT beschreibt in der Nov./Dez. Ausgabe von QEX eine 10m Turnstile-Antenne nach diesem Prinzip

⁵ „Some Notes on Turnstile Antenna Properties“, L. B. Cebik, W4RNL. Verfügbar unter: <http://on5au.be/Cebik-2/SomeNotesOnTurnstileAntennaProperties.pdf>

⁶ „Omnidirectional Antenna with Complex Conjugate Impedance for Radio Meteor Detection“, Cezar-Eduard Lesanu, Adrian Done, Cezar-Ion Adomnitei; 15th International Conference on Development and Application Systems, Suceava, Romania, 21. – 23. Mai 2020

⁷ Dateien sind verfügbar unter: <http://www.oe1cgs.at/downloads>

⁸ Vektorieller Netzwerkanalysator „NanoVNA“ und PC-Software „Nanovna-Saver v0.2“