

Eine Selbstbau-Antenne für den LEO-Satellitenfunk

***Einfach und günstig zu bauende,
gerichtete Dualbandantenne***



Christoph Schwärzler, OE1CGS
Februar 2022

Abstract

This document deals with a DIY version of a highly effective, yet easy to build antenna for amateur radio communication via orbiting satellites. The antenna is dualband with a gain of about 6,3 dBi in the 2 m and 8,4 dBi in the 70 cm band, showing an impedance of 50 Ω in both bands.

The antenna is based on a design¹ by M. Steyer, DK7ZB, but optimized by the author for typical satellite frequencies. Care was taken that this antenna can be built from readily available material, most of which to be acquired at the local hardware store. Together with some length of RG 174 coaxial cable and a BNC connector, total hardware cost is about 15 €. The antenna can be built in about 2 to 3 hours.

The design was modelled² and optimized in EZNEC, but final adjustment was performed on the real antenna using a VNA.

With its overall mass of only 220 grams, the antenna can be held for a prolonged period without pain. Finally, an optional tool for finding and following the satellite involving a simple stand for a mobile phone is shown.

Zusammenfassung

Dieses Dokument beschreibt detailliert den Selbstbau einer effektiven Antenne für den Amateurfunk über umlaufende Satelliten. Die Antenne kann sowohl im 2 m als auch 70 cm Band mit einem Gewinn von etwa 6,3 dBi bzw. 8,4 dBi direkt an 50 Ω betrieben werden.

Grundlage bildet dabei ein Antennendesign¹ von Martin Steyer, DK7ZB, welches vom Autor für die typischen Satellitenfrequenzen optimiert wurde. Beim Bau werden nur günstiges Standardmaterial aus dem Baumarkt sowie Koaxialkabel RG 174 und eine BNC-Buchse benutzt. Damit liegen die Gesamtmaterialekosten bei nur etwa 15 €. Für die Erstellung der Antenne sollten rund 2 bis 3 Stunden Arbeitszeit geplant werden.

Die Antenne wurde vorab in EZNEC modelliert² und optimiert. Nach dem Zusammenbau erfolgte die Adjustierung unter Zuhilfenahme eines vektoriiellen SWR-Messgeräts.

Die fertige Antenne hat eine Masse von nur 220 Gramm und ist daher ohne große Belastung der Hand auch längere Zeit nachführbar. Zur exakten

Ausrichtung wird eine optionale Halterung für ein Smartphone beschrieben, welches mit der angeführten App sämtliche erforderliche Daten dazu liefert.

1.) Antennendesign

Der Funkverkehr über Satelliten geschieht häufig im Mode-J oder Mode-B, d.h. mit einem Uplink zum Repeater im Satelliten im 2 m Band und einem Downlink im 70 cm Band oder umgekehrt. Dabei liegen die zumeist benutzten Frequenzen im 2 m Band in der Nähe von 145,7 MHz und im 70 cm Band nahe bei 436,5 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 aufzuschraubende 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 höheren Gewinn aufweisen, wie z.B. Yagi-Uda Antennen. Leider sind derartige Antennen in der Grundform nur für eines der beiden involvierten Bänder geeignet. Außerdem müssen sie aufgrund ihrer Richtcharakteristik während des rund 10 Minuten dauernden Satellitenüberflugs permanent nachgeführt werden, was im einfachsten Fall manuell erfolgt. Ein häufig benutztes Konzept bringt daher zwei Yagi-Antennen (je eine für das 2m und das 70cm Band) auf eine Halterung, wobei die beiden Antennen um 90° versetzt montiert sind (analog Kreuzyagi-Antennen). Nachteilig ist, dass dabei die Verwendung einer Frequenzweiche erforderlich wird, welche das Funkgerät für die beiden unterschiedlichen Frequenzen für Senden und Empfang mit jeweils der passenden Antenne verbindet. Dieser sogenannten Diplexer erhöht den Aufwand für den Bau und bringt eine (wenn auch geringe) zusätzliche Dämpfung in das System.

Das hier benutzte Design hat ebenfalls zwei Yagi-Uda Antennen auf einer Halterung, wobei nun beide in einer Ebene liegen. Nur die Antenne für das 2 m Band wird direkt angesteuert, während die 70 cm Antenne parasitär gekoppelt ist. Bei einer entsprechenden Dimensionierung kann damit nicht nur eine Richtcharakteristik erzielt werden, sondern auch ein reeller Fußpunktwiderstand von 50 Ω für

beide Bänder. Der direkte Anschluss des Funkgeräts ist somit möglich.

Im Gegensatz zu zirkular polarisierenden Antennenformen wie der quadrifilaren Helixantenne (QFH) oder der Turnstile-Antenne³ ist diese Antennenform jedoch anfälliger für Fading, hervorgerufen durch den Faraday-Effekt beim Durchtritt der elektromagnetischen Welle durch die Ionosphäre. Dem kann aber durch manuelle Drehung der Antenne bis zum Signalmaximum teilweise begegnet werden.

Das Design von Martin Steyer, DK7ZB für eine solche Dualbandantenne ist optimiert für 145,0 und 434,0 MHz. Sein Modell mit 2 Elementen für 2 m und 3 Elementen für 70 cm diente als Ausgangspunkt und wurde in einem ersten Schritt in EZNEC simuliert. Durch geringfügige Änderungen von Längen und Abständen der Elemente wurden die optimalen Betriebsfrequenzen auf 145,7 MHz und 436,5 MHz verschoben.

Für die solcherart modifizierte Antenne wurden die im Folgenden dargestellten Freiraum-Strahlungsdiagramme berechnet. Bild 1 zeigt die azimuthale Richtcharakteristik in der Antennenebene im 2m Band. Für dieses Band besteht die Antenne nur aus zwei Elementen, dem aktiven Strahler und einem Reflektor.

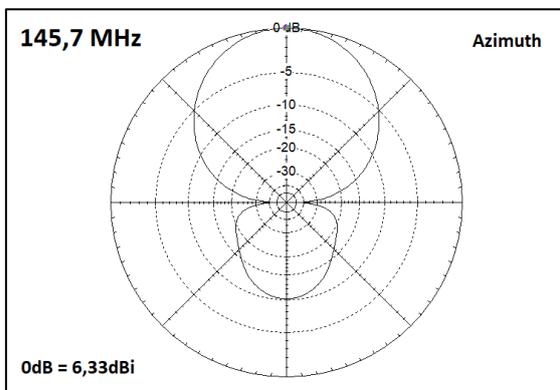


Bild 1: Azimuthales Strahlungsdiagramm für das 2 m Band laut Freiraumsimulation in EZNEC

Der Gewinn in Vorwärtsrichtung (in Bild 1 nach oben) beträgt 6,33 dB gegenüber dem isotropen Strahler. Das Vor-Rück-Verhältnis ist 10,17 dB und der -3 dB Öffnungswinkel beträgt 70°. Seitlich besitzt die Antenne beinahe keine Abstrahlung.

Die Elevationsabhängigkeit in Hauptstrahlrichtung ist in Bild 2 dargestellt. Gegenüber der verschwindend kleinen, seitlichen Abstrahlung in der Antennenebene, ist die Abstrahlung nach oben und unten deutlich größer.

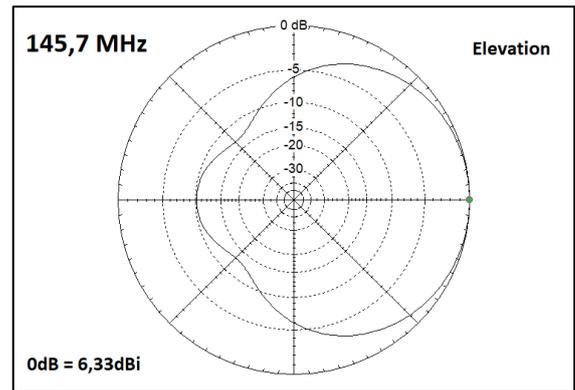


Bild 2: Elevations-Strahlungsdiagramm für das 2 m Band

Der -3 dB Öffnungswinkel aus der Antennenebene heraus beträgt 136°.

Im Idealfall sollte mit der Antennenhalterung („Boom“) immer auf den sich bewegenden Satelliten gezielt werden. Durch die beiden oben angeführten Öffnungswinkel ist dies allerdings nicht übermäßig kritisch.

Für das 70 cm Band weist die Antenne drei dezidierte Elemente auf, wobei das aktive Element (eigentlich ein 2 m Element) nicht mitgezählt ist. Daher ist es nicht verwunderlich, dass der Gewinn in Vorwärtsrichtung mit 8,37 dBi größer ist als für das 2 m Band, wie in Bild 3 ersichtlich ist.

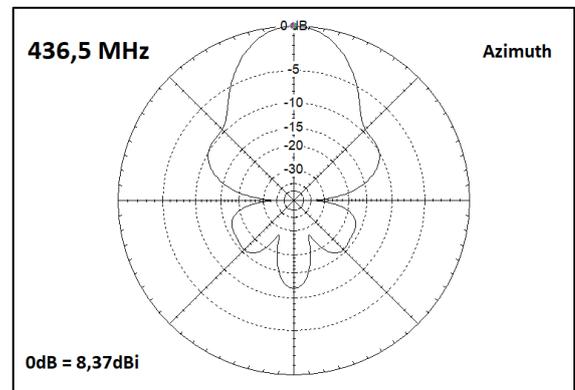


Bild 3: Strahlungsdiagramm (Azimuth) für das 70 cm Band

Ebenso ist das Vor-Rück-Verhältnis mit 11,73 dB größer als für 145,7 MHz. Wie zu erwarten war, ist der 3 dB Öffnungswinkel jedoch kleiner und beträgt nur mehr 45°.

Auch das Elevations-Strahlungsdiagramm in Bild 4 zeigt eine stärkere Bündelung, so ist der 3 dB Öffnungswinkel hier nur mehr 105°.

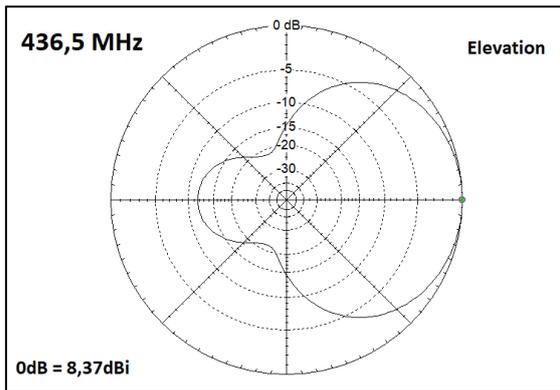


Bild 4: Elevations-Strahlungsdiagramm für das 70 cm Band

Berücksichtigt man jedoch den höheren Gewinn in Vorwärtsrichtung und berechnet daher den Öffnungswinkel für einen Rückgang auf 3,33 dBi (vgl. 2 m Band) so erhält man 58° bzw. 126°. Obwohl also bei 436,5 MHz noch mehr als bei 145,7 MHz auf die korrekte Ausrichtung der Antenne geachtet werden muss, ist auch hier eine gewisse Fehlertoleranz vorhanden. So sollten $\pm 15^\circ$ Abweichung von der Idealrichtung in allen Fällen ohne wesentliche Auswirkung auf die Signalstärke bleiben. Mit einem Smartphone als Hilfsmittel, ist wie in Kapitel 4 beschrieben, die Einhaltung dieser Abweichung leicht zu bewerkstelligen.

Das Stehwellenverhältnis SWR des Antennenmodells ist für 145,7 MHz und 436,5 MHz optimiert und erreicht für diese Frequenzen 1,0 bzw. 1,1. Bild 5 zeigt den simulierten SWR-Verlauf im 2 m Band über einen größeren Frequenzbereich.

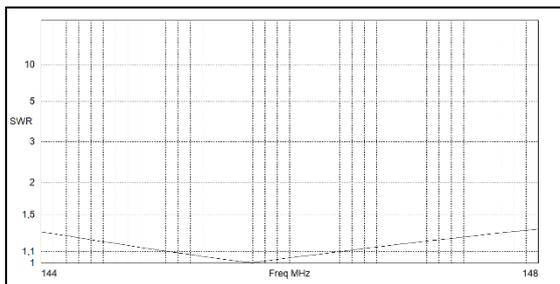


Bild 5: Berechnetes Stehwellenverhältnis für das 2 m Band

Das SWR steigt zu beiden Seiten von 145,7 MHz nur sehr moderat an und bleibt von 144 MHz bis 148 MHz deutlich unterhalb von 1,5.

Auch im 70 cm Band ist das SWR-Minimum nicht sehr scharf ausgeprägt und so sollte ein guter Bereich der Frequenzen um 436,5 MHz gearbeitet werden können.

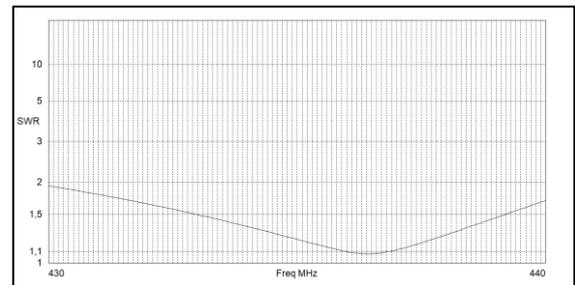


Bild 6: Berechnetes Stehwellenverhältnis für das 70 cm Band

Zu den Bandenden hin steigt das SWR dann doch über 1,5. Das berechnete Stehwellenverhältnis ist jedoch im gesamten 70 cm Band besser als 2.

Ermutigt durch die vielversprechenden Modell-ergebnisse, beschloss ich die so optimierte Antenne selbst zu bauen. Im folgenden Kapitel wird der Aufbau detailliert beschrieben. Damit sollte ein Nachbau ohne große Probleme gelingen.

2.) Bauleitung

Von Anfang an war geplant, die Antenne mit günstigem und einfach zu beschaffendem Material zu bauen. Der Großteil kommt aus dem Baumarkt, Koaxialkabel und Buchse sind Standardteile vom Elektronikhändler. Für den schnellen Überblick ist im Anhang eine Materialliste vorhanden.

An Werkzeug wird zuerst eine kleine Metallsäge benötigt, idealerweise mit einer 90° Gehrungslade – es geht aber auch ohne. Für die Löcher sind eine Bohrmaschine und diverse Metallbohrer notwendig. Ein LötKolben für den beiderseitigen Anschluss des Koaxialkabels an Lötäugen bzw. BNC-Buchse. Ein 8mm Gabelschlüssel wird für die M5 Muttern benötigt während mit einer Spitzzange die Schrauben gehalten werden. Leider muss in die beiden Aluminiumrohre für den Strahler jeweils ein M5 Innengewinde geschnitten werden. Dafür ist ein entsprechender Gewindeschneider notwendig oder ein passend ausgerüsteter Freund oder Club.

Im ersten Schritt stellen wir die Strahlerhalterung her. Es hat sich gezeigt, dass das etwas verdickte Ende eines 25 mm (Außendurchmesser) PVC-Rohres genau den passenden Durchmesser hat, um mit den darunter befindlichen Schraubenköpfen (vgl. Bild 8) auf den Träger („Boom“) aus dem dünneren 20mm PVC-Rohr aufgeschoben zu werden. Und zwar durch leichten Druck auf die Halterung so, dass diese danach von selbst auf dem Boom klemmt. Es wird daher vom verdickten Ende des 25 mm Rohres (siehe rote Markierung in Bild 7) ein 20 mm langes Stück abgesägt.

Der eigentliche Boom wird nun aus dem 20 mm PVC-Rohr hergestellt, von welchem dazu ein Stück von 80 cm abgesägt wird. Hier wird die Seite ohne Verdickung (Muffe) benutzt.



Bild 7: Das Material für den Boom ist ein 20 mm PVC-Rohr (oben), die Strahlerhalterung stammt aus dem verdickten Ende eines 25 mm Rohres (Markierung unten links).

Im nächsten Schritt werden Löcher in diese beiden Teile gebohrt. Bei der Strahlerhalterung dienen sie der Aufnahme der M5-Schrauben und haben daher einen Durchmesser von 5 mm. In den Boom werden Löcher mit einem Durchmesser von 6 mm gebohrt, durch welche später direkt die Direktoren und Reflektoren gesteckt werden. Vorsicht: Nie in einem Durchgang diese Lochdurchmesser direkt bohren, denn das Material tendiert dazu auszureißen. Immer mit einem kleinen Durchmesser von 2 bis 3 mm beginnen, und mit einem oder gar zwei Zwischenschritten auf den gewünschten Durchmesser aufbohren. Im Zweifel bitte Bohrversuche am Materialverschnitt der Rohre unternehmen.

Die Löcher in die Strahlerhalterung werden mittig zwischen vorderem und hinterem Ende, also bei 10 mm gebohrt. Sie müssen einander exakt gegenüber liegen (vgl. Bild 9). Hierfür wende ich einen kleinen Trick an: Zuerst klebe ich ein Stück Klebestreifen („Tixo“) rund um das PVC-Rohr, so, dass die späteren Bohrlöcher möglichst mittig unter dem Streifen sind. Sobald der Streifen einmal herum ist, wird noch ein Überlappungsbereich von einem bis zwei Zentimeter geklebt und dann der Streifen abgeschnitten. Innerhalb des Überlappungsbereichs wird nun mit einem kleinen (1 oder 1,5 mm) Bohrer das erste Loch durch Streifen und PVC-Rohr gebohrt. Jetzt wird der Klebestreifen vorsichtig wieder abgewickelt und vorübergehend an einen Meterstab geklebt (siehe Bild 8). Die Distanz der beiden Löcher (die aus der ersten Bohrung durch beide Klebestreifenschichten stammen) entspricht exakt dem Umfang des PVC-Rohres. Sie wird gemessen und in exakt der Hälfte dieser Distanz wird eine Markierung auf dem Streifen angebracht.

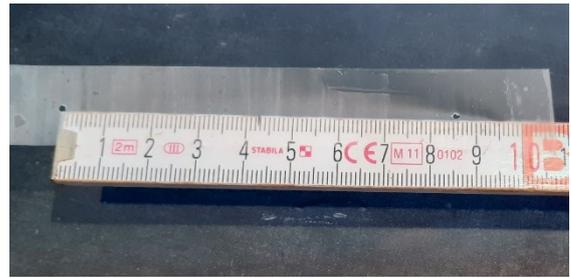


Bild 8: Ein Klebestreifen hilft bei der Vermessung der Bohrlöcher

Nun wird der Klebestreifen noch einmal auf das PVC-Rohr geklebt, und zwar so, dass die Löcher wieder genau auf das bereits in das Rohr gebohrte Loch zu liegen kommen. Klingt vielleicht etwas kompliziert, ist es aber nicht. Die markierte Stelle auf dem Klebestreifen befindet sich nun genau gegenüber der ersten Bohrung. Nun kann das zweite Loch in das PVC-Rohr gebohrt werden und anschließend beide Löcher vorsichtig auf 5 mm erweitert werden.

Als nächstes wenden wir uns dem Boom zu. Hier gilt es mehrere Dinge zu beachten. Erstens müssen sich die Löcher für ein Element wieder exakt gegenüberstehen (den Trick dafür kennen wir aber nun bereits). Zweitens muss zwischen den Löchern der jeweilige Elementabstand möglichst präzise eingehalten werden und drittens müssen die Löcherpaare alle in einer Ebene liegen, damit später die Elemente parallel zueinander sind.

Um dies zu erreichen, hat es sich bei mir bewährt, das 80 cm lange PVC-Rohr für den Boom flach auf einen Tisch zu legen und mit zwei Händen festzuhalten. Eine zweite Person legt nun einen Bleistift auf den Tisch und fährt mit diesem dann das gesamte Rohr ab. Wir haben nun auf dem Rohr eine präzise Linie für die eine Seite der Bohrungen.

Auf dieser Linie werden nun Markierungen in den folgenden Abständen vom (später) vorderen Rohrende angebracht:

10 mm	111 mm	279 mm	510 mm
-------	--------	--------	--------

Tabelle 1: Markierungen am Boom für die passiven Elemente

Diese Rohrende wird mit einem „A“ beschriftet, womit der RohrAnfang gemeint ist.

Mit der Klebestreifenmethode werden nun ein Lochpaar nach dem anderen mit dem kleinen Bohrer in das Rohr gebohrt. Abschließend werden alle Löcher vorsichtig und in mehreren Schritten auf einen Durchmesser von 6 mm aufgebohrt.

Als nächstes stellen wir die Strahlerhalterung fertig und legen uns die dafür benötigten Teile (Bild 9) bereit.



Bild 9: Sämtliche Teile der Strahlerhalterung vor der Montage

Von innen wird jetzt die erste Schraube durch ein Loch gesteckt. Von außen kommen die restlichen Teile auf die Schraube, in der Reihenfolge: Lötauge, Fächerscheibe, Mutter. Bild 10 mit der fertigen Strahlerhalterung kann für die Orientierung herangezogen werden.

Nun muss die Schraube innen fixiert werden. Wenn dies mit dem üblichen Werkzeug nicht gelingt, sollte es mit einer Flach- oder Spitzzange gelingen. Bevor die Mutter festgezogen wird, muss das Lötauge richtig orientiert werden. Es sollte in einem Winkel von rund 30° zur Rohrlängsachse zu stehen kommen. Dadurch kommt später das anzulötende Koaxialkabel gleich in die passende Richtung. Es hat sich bewährt, für diesen Schritt auch eine zweite Person um Hilfe zu bitten. Die Mutter bitte gut festziehen, da die Schraube später in montiertem Zustand nur mehr schwer zu fixieren ist (ich hatte diesen Fall noch nie, aber u.U. könnte es mit zwei, vorübergehend von außen aufgeschraubten und gegeneinander festgezogenen Muttern als Fixierung funktionieren).

Die zweite Seite wird genau gleich montiert, wobei jedoch darauf geachtet werden muss, dass das zweite Lötauge in die gleiche Richtung zeigt wie das erste (siehe Bild 10).



Bild 10: Fertig montierter Strahlerkopf

Im nächsten Schritt stellen wir die Elemente her, indem wir von den Aluminiumrohren passende Stücke absägen. Insgesamt werden sechs Rohrstücke benötigt: Drei Elemente für das 70 cm Band, einen Reflektor für das 2 m Band und die zwei Teile des angetriebenen Elements (=Strahler).

Soll eine funktionsfähige Antenne ohne weiteren Aufwand gebaut werden, dann bitte direkt die im Folgenden angegebenen Längen millimetergenau einhalten. Möchte man jedoch selbst die Antenne perfektionieren und verfügt dazu über die notwendige Messausrüstung und Geduld, so kann man zu den angegebenen Längen jeweils einige Millimeter addieren und sich dann später bei der fertig aufgebauten Antenne durch sukzessives Kürzen an das Optimum herantasten.

Die drei Elemente für das 70 cm Band haben die folgenden Längen:

299 mm	312 mm	316 mm
--------	--------	--------

Tabelle 2: Elementlängen für das 70 cm Band

Nach dem Ablängen können eine oder beide Enden noch scharfe oder unregelmäßige Kanten aufweisen. Diese sind leicht zu entfernen, wenn das Aluminiumrohr in eine Bohrmaschine eingespannt wird und das Ende bei langsamer Drehgeschwindigkeit mit einer Feile bearbeitet wird. Darauf achten, dass kein seitlicher Druck ausgeübt und damit das Rohr verbogen wird.

Dann den Direktor für 2 m ablängen. Tip: Der Direktor ist das mit Abstand längste Element und damit etwas unhandlich und schwerer zu verstauen. Er könnte auch in zwei Hälften hergestellt werden, die dann mit je einem Gewinde versehen und zur Montage mit einem kurzen Stück Gewindestange verbunden werden.

Die Länge für den gesamten Direktor beträgt:

1014 mm

Tabelle 3: Direktor für das 2 m Band

Die beiden Strahlerhälften werden nun vorerst absichtlich etwas zu lang hergestellt. Das hat den Grund darin, dass die Zuleitung durch das Koaxialkabel bereits ab der Stelle des Auftrennung von Innen- und Außenleiter zu strahlenden Elementen und daher zu einem Teil des Strahlers werden. Die exakte Länge dieser Zuleitungen kann aber erst nach der Montage des Strahlerkopfs und des Koaxialkabels am jeweiligen Antennenaufbau ermittelt werden.

Daher werden die beiden Strahlerhälften nun auf eine Länge von jeweils 450 mm abgesägt und

später nochmals auf die korrekte Gesamtlänge samt Zuleitung gekürzt.

2x 450 mm

Tabelle 4: Die beiden Aluminiumrohre für die Strahler werden vorerst absichtlich etwas zu lang hergestellt.

Jetzt wird in jede der beiden Strahlerhälften auf jeweils einer Seite ein ca. 11 mm langes M5 Innengewinde geschnitten. Dafür ist leider spezielles Werkzeug erforderlich, mit welchem dieser Arbeitsschritt dann aber auch eine Kleinigkeit ist. Ein Tropfen Schneidmittel wie z.B. Spiritus erleichtert das Schneiden noch mehr.

Nun sind alle Elemente vorhanden. Das Ensemble sieht aus, wie in Bild 11 dargestellt.



Bild 11: Sämtliche Elemente für die Dualbandantenne: Die drei kurzen Aluminiumrohre für 70 cm, die beiden, mittellangen Strahlerhälften und der lange Direktor für das 2 m Band

Bevor als nächstes der Strahlerkopf auf den Boom aufgeschoben wird, sollte eine Positionsmarkierung für ihn auf dem Boom angebracht werden. Diese soll so erfolgen, dass sich die Strahlermitte (=Längsmitte der M5-Schrauben) 29 mm hinter dem Mittelpunkt des mittleren kurzen Elements befinden, also 140 mm vom vorderen Rohrende entfernt. Da diese Stelle aber von der Strahlerhalterung verdeckt wird, empfiehlt es sich, die Markierung so anzubringen, dass sie das hintere Ende der Halterung anzeigt. Wurden die oben beschriebenen Maße (Halterung 20 mm lang und Bohrung exakt in der Mitte bei 10 mm) eingehalten, so sollte die Markierung 39 mm hinter der Mitte des zweiten Lochpaares bzw. 150 mm vom Rohranfang „A“ angebracht werden.

Der Strahlerkopf wird am besten von der Vorderseite des Booms auf diesen aufgeschoben, indem er mit zwei Fingern kräftig zwischen den Schrauben zusammengedrückt und damit bei den Schrauben verbreitert wird. Auf diese Weise wird er in die Position gebracht, wo er mit der vorhin angebrachten Markierung übereinstimmt und gleichzeitig die beiden Schrauben in einer Ebene mit den übrigen Elementen liegen. Um letzteres zu überprüfen, ist es hilfreich, den langen Direktorstab durch das dem Strahlerkopf nächstgelegene Lochpaar im Boom zu stecken und die beiden Strahlerhälften auf den Kopf aufzuschrauben. Nun kann der Kopf so feinadjustiert werden, dass die Aluminiumrohre möglichst parallel zueinander liegen.

Normalerweise klemmt der Strahlerkopf nun so fest auf dem Boom, dass keine weitere Stabilisierung erforderlich ist. Wem dies aber zu wenig ist, der kann den Kopf an der Ober- oder Unterseite zusätzlich mit einer kleinen Metallschraube durch Kopf und Boom fixieren.

Für den folgenden Arbeitsschritt können die Strahler und der Direktor wieder entfernt werden. Vom bereitgelegten RG 174 Koaxialkabel wird nun ein Stück von rd. 120 cm genommen und auf einem Ende der Innen- vom Außenleiter getrennt. Die Länge der Trennung hängt nun ein wenig von den benutzten Lötäugen und deren Winkel zum Boom ab. Dabei sollten die beiden Leiter gleich lang sein und nur so weit getrennt werden, dass sie von der Mitte der Boomoberseite (diejenige Seite auf welche die Lötäugen zeigen) gerade auf jeweils ein Lötauge gebracht und dort verlötet werden können. Dies wird eine Länge von ungefähr 20 mm sein, kann aber im Einzelfall variieren. Über diese Länge wird die äußere Isolation vom Koaxialkabel entfernt und dann das Geflecht des Außenleiters auf eine Seite hin zu einer Art Litzenkabel verdrillt. Ein Stück Schrumpfschlauch über den verdrillten Außenleiter kann diesen etwas schützen, aber es müssen die vordersten paar Millimeter für die Verlotung mit dem Lötauge frei bleiben. Die innere Isolation des Koaxialkabels wird nur am Ende, soweit es für das Verlöten des Innenleiters mit dem Lötauge notwendig ist, entfernt.

Wenn nun von der Seite des Booms her, zu welcher die Anschlüsse der Lötäugen zeigen der verdrillte Außenleiter mit dem einen Lötauge, und der Innenleiter mit dem anderen Lötauge verlötet wird, so sollten die getrennten Leiterlängen gerade dafür ausreichen, dass die Lötäugen erreicht werden, aber nicht mehr. Falls notwendig, beiderseits gleichmäßig noch etwas kürzen oder die Leitertrennung verlängern. Es ist übrigens egal, auf welcher Seite der Außen- und auf welcher der Innenleiter angeschlossen wird. Das Bild 12 zeigt ein Detail mit Strahlerkopf und angelötetem Koaxialkabel.



Bild 12: Die Leiter des Koaxialkabels werden nur so weit wie notwendig getrennt und mit den Lötäugen verlötet.

Jetzt das Koaxialkabel sechs Mal um den Boom wickeln, und zwar dicht an dicht anliegend. Die Wickelrichtung ist egal, es geht aber etwas leichter, wenn die Richtung des Außenleiters fortgesetzt wird. Damit wird für Ströme, welche auf der Außenseite des Außenleiters fließen wollten, eine Spule realisiert, welche eine Mantelwellensperre darstellt.

Die Stelle am Boom markieren, wo die sechste Windung komplett ist. Sie befindet sich mittig auf der Boomoberseite. An dieser Stelle wird nun ein 3 mm Loch in das PVC-Rohr gebohrt. Sollte das verwendete RG 174 Kabel einen etwas größeren Durchmesser aufweisen, so muss nachgefeilt oder aufgebohrt werden. Der Durchmesser des Loches soll aber nur gerade groß genug sein, dass das Koaxialkabel unter sanftem Druck hindurchgeht.

Das inzwischen lose Koaxialkabel nochmals straff um den Boom wickeln und jetzt das Ende durch das soeben gebohrte Loch in das Boominnere führen. Darauf achten, dass sich das Kabel im Inneren in Richtung des hinteren Endes des Booms bewegt, also weg von Punkt „A“. Es wird notwendig sein, das Kabel stückweise mit Druck durch das Loch zu schieben und das Kabelende weiter durch den Boom zu schieben bzw. bereits aus dem Boom zu ziehen. Wenn das ganze Kabel durch ist, sollten die Windungen dicht und straff am Boom anliegen und durch die Reibung am Loch auch so gehalten werden. Bild 13 zeigt, wie dieser Teil der Antenne nun aussehen sollte.

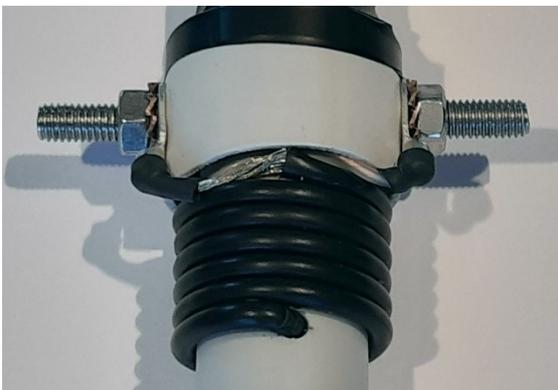


Bild 13: Antennendetail mit Strahlerkopf und Mantelwellensperre durch das um den Boom gewickelte Koaxialkabel.

Als nächstes wird die BNC-Buchse (natürlich wäre auch ein anderes System möglich) an das hintere Boomende montiert. Hier ist etwas Improvisationstalent gefragt. Benötigt wird eine Scheibe mit einem Durchmesser von 20 mm, in welche das Montageloch für die Buchse gebohrt wird und die nach dem Anlöten der Koaxialleitung mit dem PVC-Rohr verklebt wird. In der Tonne für Plastikabfälle findet sich sicher irgendein Stück PVC-Kunststoff,

das mit Schere, Messer oder Feile auf Maß gebracht werden kann. PVC lässt sich mit PVC hervorragend verkleben, aber auch andere Kunststoffe können verarbeitet werden. Am besten an einem Stück Verschnitt Klebeversuche mit einem Kunststoffkleber unternehmen. Wenn verfügbar, kann natürlich mit einem 3D-Drucker auch ein maßgeschneidertes Teil erzeugt werden, eine passende Objektbeschreibung steht zum Download⁴ zur Verfügung.

Nachdem die Buchse auf diese Scheibe montiert ist, wird das Koaxialkabel passend abgeschnitten und mit der Buchse verlötet, bevor alles an das Rohrende geklebt wird. Bild 14 zeigt die montierte Buchse.



Bild 14: Detail der Anschlussbuchse für das Funkgerät

Sämtliche Elemente werden nun symmetrisch am Boom montiert. Auf beiden Seiten des PVC-Rohres muss sich also die gleiche Länge Aluminiumrohr befinden. Für den späteren, praktischen Einsatz ist es sinnvoll, auf den passiven Elementen direkt neben dem Boom eine Markierung anzubringen. Falls die gegenüberliegenden Löcher im PVC-Rohr für die passiven Elemente nicht exakt gebohrt wurden, haben die Aluminiumrohre eine leichte Reibung am Boom und klemmen dadurch von selbst. Wer präzise gearbeitet hat wird dadurch bestraft, dass die Rohre durch die Bohrungen durchrutschen. Dafür gibt es eine einfache Abhilfe: Gummiringe über die Alurohre und quer über den Boom gezogen, sind schnell angebracht und fixieren die Elemente (Bild 15).



Bild 15: Mit einem Gummiring können die Elemente leicht in Position gehalten werden

Die Antenne ist jetzt zwar fertig aufgebaut, aber die angetriebenen Elemente sind mit Sicherheit noch zu lang und die Antenne daher auf einer 2 m Frequenz resonant, welche um mehrere MHz zu niedrig liegt.

Wer über ein geeignetes Messgerät verfügt, kann nun selbst optimieren, indem die Frequenz mit dem niedrigsten SWV durch sukzessives und gleiches Kürzen der beiden Strahlerelemente in die Nähe von 145,7 MHz gebracht wird. Bitte nur in Schritten von ein bis zwei Millimetern ablängen und darauf achten, dass nicht an der Seite mit dem eingeschnittenen Gewinde gekürzt wird!

Wenn kein Messgerät zur Verfügung steht, werden die Aluminiumrohre so gekürzt, dass sie zusammen mit den Zuleitungen ab der Auftrennung von Innen- und Außenleiter des Koaxialkabels eine Länge von jeweils 466 mm aufweisen. Realistisches Beispiel: Wenn die Länge von der Trennung über den Ringkabelschuh und die Mutter bis zum Beginn des Aluminiumrohres 24 mm beträgt, so werden die Elemente auf 442 mm gekürzt. Jetzt sollte das SWV jedenfalls besser als 1,5 und damit ein sicherer Betrieb des Funkgerätes gewährleistet sein.

Damit ist die Antenne fertiggestellt und betriebsbereit. Zur mechanischen Verstärkung des Strahlerhalterung und zum Schutz des Koaxialkabelendes habe ich diesen Bereich mit etwas Isolierband umwickelt. Bild 16 zeigt nochmals übersichtlich die Maße der fertigen Antenne:

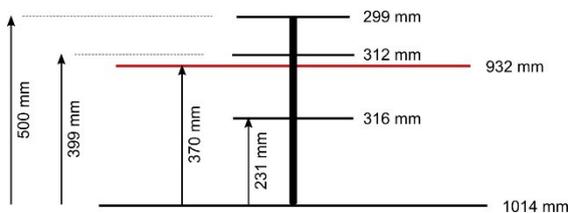


Bild 16: Die wesentlichen Antennendimensionen. Beim aktiven Element (rot) müssen die Zuleitungen eingerechnet werden.

Für den Transport werden die Elemente abgenommen bzw. abgeschraubt. Tip: Aus einer Länge von etwa 105 cm des restlichen PVC-Rohres kann leicht ein Köcher für die Elemente gebastelt werden, womit sich die gesamte Antenne bequem und sicher transportieren lässt.

3.) Messungen an der Antenne

Ich habe an der fertig aufgebauten Antenne einige Messungen durchgeführt und konnte dabei die in der Simulation ermittelten Werte bestätigt finden. Insbesondere zeigt der gemessene Verlauf des Stehwellenverhältnisses für das 2 m Band, dass

dieses im gesamten Band besser als 1,5 bleibt (Bild 17). Bei 145,8 MHz erreicht meine Antenne das minimale SWV bei einem Wert nur wenig über 1,0.

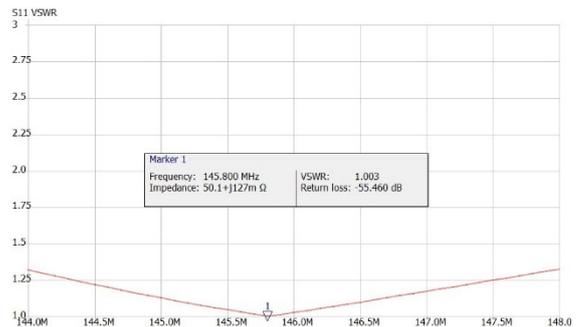


Bild 17: Gemessenes Stehwellenverhältnis für das 2 m Band

Es ist also möglich diese Antenne auch für andere mobile Aktivitäten im 2 m Band wie z.B. SOTA zu benutzen. Ähnliches gilt für das 70 cm Band (Bild 18), wengleich das SWV hier an den Bandenden etwas höher liegt.



Bild 18: Messung des SWV für das 70 cm Band

Wie bei der Simulation, ist das bestmögliche SWV im 70 cm Band mit 1,06 eine Spur schlechter. Dieser Wert wird bei meiner Antenne bei 436,5 MHz erreicht.

Schwieriger ist die messtechnische Überprüfung der Abstrahlcharakteristik, müssen doch derartige Messungen über realem Boden erfolgen und sind vielfachen Störfaktoren ausgesetzt. Dennoch konnten mit einer kleinen Messantenne an einem Spektrumanalysator die Modellergebnisse nicht nur qualitativ verifiziert werden (vgl. Kapitel 1).

Das Vor-Rück-Verhältnis im 2 m Band für 145,8 MHz wurde mit -12,8 dB gemessen, bei 436,5 MHz sind es -14,2 dB. Seitliche Abstrahlungen sind im 2 m Band um -19,3 dB gegenüber der Hauptrichtung unterdrückt, im 70 cm Band sind es -26,4 dB.

Es ist auch erkennbar, dass die 2 Elemente für das 2 m Band einen geringeren Öffnungswinkel mit sich bringen als die 3 Elemente im 70 cm Band. Während bei $\pm 45^\circ$ gegenüber Recht voraus (entspricht einem Öffnungswinkel von 90°) im 2 m Band eine Abschwächung um -4,5 dB gemessen wurde, waren dies im 70 cm Band bereits -15,0 dB.

4.) Optional: Halterung für Mobiltelefon

Obwohl die Öffnungswinkel der Antenne mit 70° bzw. 45° noch vernünftig groß sind (vgl. Kapitel 1), sollte die Yagi-Uda Antenne natürlich mit dem Boom direkt auf den sich bewegenden Satelliten zielen. Zum Glück gibt es dafür diverse Hilfsmittel. Ich benutze eine App namens „Look4Sat“ welche ich auf meinem Android Smartphone installiert habe. Sie ist im Google PlayStore kostenlos verfügbar. Mit dieser App können die Überflüge sämtlicher in Frage kommender Amateurfunksatelliten präzise vorhergesagt werden. Sie zeigt auch permanent die einzustellenden Frequenzen (samt Doppler-Verschiebung) an. Besonders praktisch ist jedoch die Anzeige der jeweils aktuellen Richtung zum Satelliten während eines Überflugs, wobei auf den eingebauten Kompass sowie Neigungsmesser des Mobiltelefons zugegriffen wird. Dies sieht dann wie in Bild 19 aus. Die rote Linie zeigt den Weg, der gelbe Punkt markiert die gerade aktuelle Position des Satelliten. Das rote Fadenkreuz bewegt sich mit der Ausrichtung des Mobiltelefons und zeigt die Himmelsrichtung und Elevation an, in welche das Telefon momentan zeigt. Wird das Fadenkreuz mit dem gelben Punkt in Deckung gebracht, so zeigt das Mobiltelefon exakt in Richtung des Satelliten.

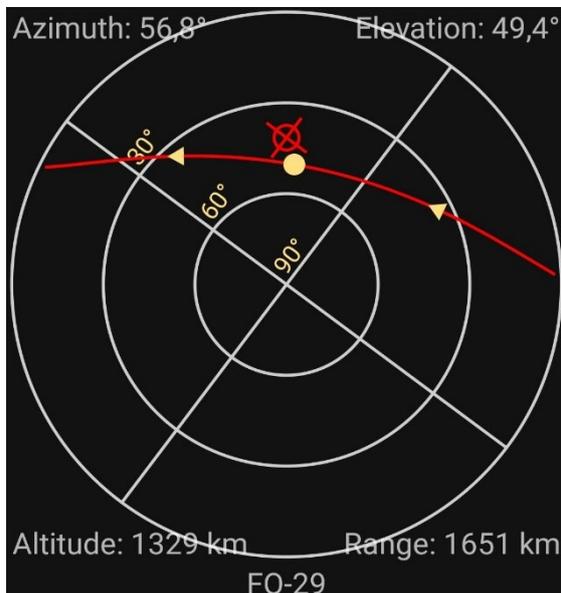


Bild 19: Die App „Look4Sat“ zeigt die aktuelle Richtung und Elevation zum Satelliten während eines Überflugs an

Es empfiehlt sich, das Mobiltelefon direkt auf die Antenne zu montieren. Dann muss nur die Antenne bewegt werden, bis Fadenkreuz und Punkt zusammenpassen, und schon ist die Yagi-Uda perfekt auf den Satelliten ausgerichtet.

Mit ein paar wenigen Teilen (Bild 20) kann eine Halterung für das Mobiltelefon leicht selbst gebaut werden.

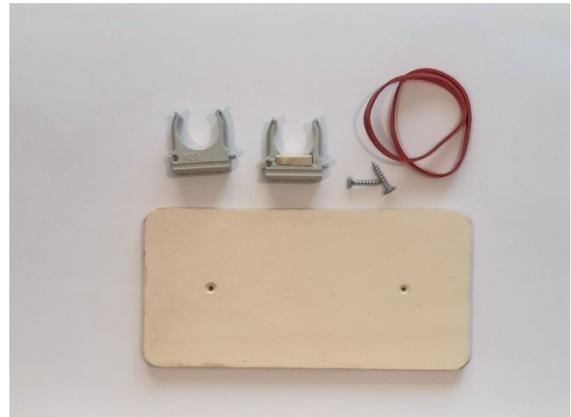


Bild 20: Teile für die Halterung

Passend zu den PVC-Rohren gibt es Klemmschellen (wir benötigen die für 20 mm Rohr), an welche ich jeweils ein kleines Stück Holz geklebt habe. Ein daran angeschraubtes Brett kann dann direkt auf dem Boom befestigt und leicht wieder abgenommen werden. Das Mobiltelefon wird mit zwei stärkeren Gummiringen am Brett gehalten (Bild 21).



Bild 21: Mit dem montierten Mobiltelefon und der passenden Software wird die Nachführung deutlich einfacher

ANHANG: Materialliste

Die folgende Materialliste soll als Hilfe bei der Suche nach den passenden Komponenten dienen. Die PVC- und Aluminiumrohre sowie Schrauben samt Zubehör sollten im lokalen Baumarkt erhältlich sein, eventuell auch die Lötungen. Die PVC-Rohre sind in der Elektroabteilung, und sind eigentlich für die Verlegung von Stromleitungen gedacht. Bei den Alurohren bitte möglichst gerade Rohre aussuchen. Die BNC-Buchse, das Koaxialkabel und die Lötungen sind jedenfalls im Elektronikhandel verfügbar.

Für den optionalen Handyhalter wären noch Klemmschellen, Holzschrauben und ein kleines Stück Sperrholz erforderlich.

Materialliste
1 Stk. PVC-Rohr 20 mm Außendurchmesser
1 Stk. PVC-Rohr 25 mm Außendurchmesser
Aluminiumrohr 6 mm Außendurchmesser, 1 mm Wanddicke 2 Stk. zu je 2m Länge
2 Stk. Schraube M5x16mm, Sechskant
2 Stk. Mutter M5
2 Stk. Fächerscheibe M5
BNC-Einbaubuchse
120 cm Koaxialkabel RG 174
<i>Optional (Halter für Mobiltelefon):</i>
2 Stk. Klemmschellen für 20 mm Rohr
2 Stk. Holzschrauben
Sperrholz, etwa 4 bis 6 mm Dicke

Tabelle 5: Benötigtes Material für die Dualbandantenne

¹ Martin Steyer, DK7ZB: https://www.qsl.net/dk7zb/Duoband/duoband_2-70_2-3.htm

² Das EZNEC-Modell steht zum Download zur Verfügung: <http://www.oe1cgs.at/downloads/>

³ Ein Design für den Selbstbau ist hier zu finden: <http://www.oe1cgs.at/easy-turnstile-antenne-fuer-den-satellitenfunk/>

⁴ <http://www.oe1cgs.at/downloads/> (die seitliche Ausnehmung am BNC-Montageteil ist während der Montage für die Lasche des Masseanschlusses gedacht)