

Die ungewöhnliche Twisted-Yagi-Antenne

Beitrag von „Sys_RoBOTer“ vom 27. November 2020, 07:44

[Zitat von Hamspirit.de](#)

In diesem Artikel möchte ich eine bisher recht unbekannt Form zirkulär polarisierender Antennen vorstellen: Die „Twisted Yagi“. Dies ist eine in sich verdrehte [Yagi-Uda-Antenne](#), die sehr einfach zu bauen ist und, wenn sie korrekt dimensioniert ist, ebenso wie eine [Kreuzdipol-](#), Kreuzyagi- oder [Wendelantenne](#) zirkulär polarisierte Wellen erzeugt bzw. empfängt.

Horizontal, vertikal, zirkulär oder diagonal?

Die bekanntesten Arten, eine elektromagnetische Welle zu [polarisieren](#), sind zweifelsfrei die horizontale und vertikale Polarisation. Diese sollten auch jedem Funkamateurer bekannt sein. Es gibt jedoch vier weitere Grundformen der Polarisation, davon zwei diagonale und zwei zirkuläre. Alle 6 lassen sich auf der sogenannten [Poincaré-Kugel](#) darstellen:

[IMG: https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/600px-Poincare-sphere_arrows.svg -576x576.png]

Die verschiedenen Formen der Polarisation elektromagnetischer Wellen lassen sich im Modell auf der sogenannten [Poincaré-Kugel](#) verorten. (Bild: User „[Geek3](#)“ auf commons.wikimedia.org, Lizenz: [CC BY 3.0](#))

Auch Mischformen sind möglich; diese befinden sich dann irgendwo anders auf der Kugeloberfläche. In diesem Falle spricht man auch von „elliptischer Polarisation“.

Bei zirkulärer Polarisation ist zwischen linkshändiger und rechtshändiger zirkulärer Polarisation zu unterscheiden. Eine linkshändig zirkulär polarisierte Antenne empfängt Signale einer rechtshändig polarisierten Antenne nur stark gedämpft und umgekehrt (in der Theorie $-\infty$ dB). Beide Formen zirkulär polarisierender Antennen können jedoch linear polarisierte Signale (horizontal, vertikal, diagonal) mit konstanter Dämpfung (-3 dB, unabhängig von der Drehung der Antennen) empfangen.

Es gilt: Zwei auf der Poincaré-Kugel gegenüberliegende Polarisationsarten führen zu einem Empfangspegel von theoretisch $-\infty$ dB, also zu einer vollständigen Signalauslöschung (in der Praxis können mehrere zehn dB Dämpfung auftreten). Bei um 90° verschobenen Punkten auf der Poincaré-Kugel liegt der Empfangspegel bei -3

dB, d.h. 50% der Energie geht verloren. Nur wenn die Polarisation auf Sende- und Empfängerseite exakt übereinstimmt, kann die gesamte Energie von der Antenne aufgenommen werden.

Warum zirkuläre Polarisation?

Zirkuläre Polarisation spielt unter anderem eine Rolle bei der Satellitenkommunikation, denn ein Vorteil der zirkulären Polarisation ist, dass Antennen mechanisch um die Achse der Sende- bzw. Empfangsrichtung gedreht werden können, ohne dass die Signale in Abhängigkeit dieser Drehung gedämpft werden. Da die Ausrichtung eines Satelliten nicht immer bekannt ist, vermeidet die zirkuläre Polarisation so Verluste durch eine gegenüber dem Satelliten falsch gedrehte Antenne auf der Planetenoberfläche.

Zirkuläre Polarisation nach der alten Schule

Zwei typische Antennenformen für zirkuläre Polarisation sind der Kreuzdipol und die Kreuzyagi.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/539px-SatelliteAntenna-137MHz.jpg>]

Kreuzdipol mit Reflektor (Bild: K. Krallis, User „[SV1XV](#)“ auf commons.wikimedia.org, Lizenz: [CC BY 4.0](#))

Diese seit langem bekannten Antennenformen haben gemeinsam, dass eine eigentlich linear polarisierende Antennenkonstruktion Grundlage ist. Diese wird verdoppelt und die beiden Teile werden um 90° gegeneinander verdreht überlagert und mit einem um 90° gegeneinander phasenverschobenen Signal gespeist. So entsteht ein elektromagnetisches Feld, bei dem z.B. die X-Komponente den gleichen Betrag aufweist wie die Y-Komponente, beide Komponenten jedoch um 90° phasenverschoben sind.

Selbst im Falle des einfachen Kreuzdipols ist hierzu neben der Verdoppelung der Konstruktion ein Aufteilen des Signales auf zwei Erreger nötig, einschließlich der Erzeugung eines um 90° phasenverschobenen Signals (beispielsweise mittels einer 1/4-Lambda Verzögerungsleitung). Je nach Konstruktion können weitere Stich- oder 1/4-Lambda-Transformationsleitungen nötig sein, um die durch die Aufteilung veränderte Impedanz anzupassen.

Die Twisted-Yagi hingegen kommt ohne Anpassleitungen und ohne Verzögerungsleitung aus und ist leicht unter Verwendung kostengünstiger Materialien, die sich in jedem Baumarkt finden lassen sollten, zu bauen.

Zirkuläre Polarisation durch parasitäre Elemente

Anstelle einen Erreger für den horizontalen und einen weiteren Erreger für den vertikalen Anteil zu verwenden, oder – wie bei der Wendelantenne – eine aufwändige Helix zu konstruieren, wird bei der Twisted-Yagi lediglich ein ganz normaler Dipol als Erreger benötigt. Die zirkuläre Polarisation wird durch parasitäre Elemente erzeugt, wie sie auch bei einer Yagi-Uda-Antenne vorkommen. Diese werden gegenüber dem Erreger verdreht angebracht. Da die parasitären Elemente phasenverzögert schwingen, entsteht so eine zirkuläre Polarisation – ganz ohne Verzögerungsleitungen.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-struct.gif>]

Erreger sowie 3 verdrehte parasitäre Elemente

Reflektor optional

Unter den vorbenannten Rahmenbedingungen hat sich herausgestellt, dass ein (ebenfalls verdreht angebrachter) stabförmiger Reflektor hinter dem Erreger zwar hilfreich ist, man jedoch statt dessen die Anzahl der Direktoren auch um eins erhöhen kann. Es ergeben sich dann geringfügige Unterschiede in den Eigenschaften (z.B. geringfügig mehr Gewinn, jedoch ein schlechteres Vor-/Rückverhältnis o.ä.). In Abhängigkeit von Rahmenbedingungen (z.B. verfügbaren Stablängen) und gewünschten Eigenschaften kann es also Sinn machen, auch Varianten ohne Reflektor in Betracht zu ziehen. In jedem Falle muss bei einer solchen Änderung die Antenne jedoch neu berechnet werden.

Computersimulation

Ich habe einige Simulationen mit [NEC2C](#) und [Automatik](#) durchgeführt. Das schwierige hierbei ist, die richtige Zielfunktion für die Optimierung festzulegen. Optimiert man eine Antenne auf möglichst hohen Gewinn bei z.B. rechtshändiger Polarisation, dann wäre eine Antenne mit linearem Anteil unter Umständen geeigneter als eine rein zirkulär polarisierende Antenne. Um ein Beispiel zu nennen: Eine linear polarisierte Antenne mit 20 dBi Gewinn hätte immer noch 17 dBi Gewinn bei zirkulärer Polarisation auf der Gegenseite. Doch eine solche Antenne würde bei linearer Polarisation auf der Gegenseite (z.B. bei einem Satelliten mit Dipol) bei falscher Drehung deutlich höhere Polarisationsdämpfungen als die zu erwartenden 3 dB aufweisen und könnte dann im ungünstigsten Falle einer Antenne mit deutlich weniger Gewinn (z.B. 13 dBi), die jedoch 100% zirkulär polarisiert, unterlegen sein.

Aus diesem Grunde habe ich die im Folgenden präsentierte Antenne nicht auf hohen Gewinn für perfekt zirkulär polarisierte Wellen optimiert, sondern statt dessen den Worst-Case bei linearer Polarisation betrachtet und für diesen Fall den Gewinn optimiert.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/polarisationsparadox->

[576x598.png](#)]

Zweidimensionaler Schnitt durch die Poincaré-Kugel. Normalerweise entsteht beim Empfang von linear polarisierten Wellen mit einer zirkulär polarisierenden Antenne ein Verlust von 50%, entsprechend -3 dB. Bereits geringe Abweichungen von der zirkulären Polarisation (hier im Bild lediglich 1 dB Polarisationsdämpfung bei zirkulär polarisierten Wellen) können im ungünstigsten Falle große Dämpfungen beim Empfang ungünstig orientierter linear polarisierter Wellen (hier im Bild 10 dB Verlust bei vertikaler Polarisation) verursachen.

Als weitere Zielparаметer wurden 50 Ohm Speisepunktimpedanz verlangt und eine Unterdrückung von Rück- und Seitenstrahlung gefordert. Im Ergebnis entsteht eine Antenne, die in Hauptstrahlrichtung beinahe 100% zirkulär polarisiert und fast keine Energie nach hinten oder zur Seite abstrahlt bzw. von dort empfängt.

Ich habe mich für eine Variante mit Reflektor entschieden, da diese im Falle meiner Simulation ein sauberes Abstrahldiagramm ohne Nebenkeulen aufwies. Als Direktorenanzahl habe ich 2 gewählt. Da es kaum Rückstrahlung gibt und der Maximalgewinn mit knapp 8 dBi moderat ist, kann die Hauptkeule einen sehr großen Raumwinkel abdecken, so dass es einfach ist, die Antenne auch per Hand nachzuführen. Um den Nachbau (siehe unten) möglichst einfach zu machen, habe ich die Länge des Reflektors auf einen Meter festgelegt, da Aluminiumstäbe genau dieser Länge leicht zu beschaffen sind. Die Längen und Positionierungen der anderen Elemente wurden im Rahmen der [evolutionären Optimierung](#) an die Reflektorlänge von 1 m angepasst.

Gegenüber einer Yagi-Uda-Antenne gleicher Größe ist die Optimierung einer Twisted-Yagi komplizierter, da durch die zusätzliche Drehung bzw. das zusätzliche Kippen der parasitären Elemente weitere Freiheitsgrade im Modell entstehen. Es kommt also darauf an, einen Algorithmus für die Optimierung zu verwenden, der auch mit einer größeren Zahl Freiheitsgrade zurecht kommt. Der evolutionäre Ansatz der von mir entwickelten Software „[Automatik](#)“ hat sich jedoch nach einigem Herumprobieren als wirkungsvoll erwiesen. Ich musste jedoch noch ein geeignetes Script zur Bewertung des Worst-Case bei linearer Polarisation der Gegenseite (wie weiter oben erläutert), ausgehend von den NEC2C Ausgabedateien programmieren.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-radiation.gif>]

Keine Nebenkeule im Richtdiagramm (Skalierung linear zur Feldstärke)

Der Maximalgewinn beträgt 7,95 dBi bei 145 MHz. Betrachtet man nur den rechtszirkulären Anteil, so ist der Maximalgewinn 7,94 dBi. Die Antenne polarisiert in Hauptstrahlrichtung also tatsächlich zu fast 100%. Wird auf der Gegenseite eine linear polarisierte Antenne eingesetzt, ist der Gewinn in Hauptstrahlrichtung 3 dB geringer

(aber unabhängig von der Drehung der Antenne). Oberhalb von 145 MHz bis zur Bandgrenze von 146 MHz steigt der Gewinn noch geringfügig an. Die Antenne ist mit einer Gesamtlänge von ca. einem Meter noch vergleichsweise kompakt.

Eine 2m-Band-Antenne zum Nachbau

Aus Kabelrohren, Kabelrohrschellen und Alu-Rohren mit 6 mm Durchmesser lässt sich die Antenne innerhalb kurzer Zeit nachbauen.

Wir benötigen folgendes Material:

- 4 hohle Aluminiumrundstäbe mit 6 mm Außendurchmesser zum Bau des Erregers, des Reflektors und der Direktoren
- ein ca. 1,20 m langes Plastikkabelrohr mit 25 mm Durchmesser als Boom
- 4 passende Kabelrohrschellen (Achtung: Diese sollten hinreichend dick sein um die Alurundstäbe daran befestigen zu können)
- 2 Quetschkabelschuhe mit Öse
- 2 zu den Kabelschuhen passende Schrauben
- zu den Kabelschuhen passendes Anschlussmaterial einschließlich Symmetrierung (je nach Ausführung z.B. PL-Buchse mit zwei kurzen Anschlusskabeln sowie Mantelwellensperre)
- Isolierband

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2913-576x384.jpg>]

Ausgangsmaterial

Schritt 1: Zusägen der Direktoren und des Erregers

Die beiden Direktoren müssen mit [Hilfe](#) einer Säge auf folgende Länge gebracht werden:

1. Direktor: 96 cm
2. Direktor: 91 cm

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2916-576x384.jpg>]

Kürzen der Direktoren auf die richtige Länge

Der Erreger wird in zwei gleichgroße Teile, die jeweils eine Länge von knapp unter 50 cm Länge haben sollten, geteilt. Dieser kann später (im letzten Schritt 9) ggf. noch leicht gekürzt werden.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction->

[2925-576x384.jpg](#)]

Einer der Aluminiumrundstäbe wird genau in der Mitte geteilt um die Erreger Elemente zu erhalten.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2929-576x384.jpg>]

Die gekürzten bzw. zerteilten Rundstäbe

Schritt 2: Durchbohren der Kabelrohrschellen

In die Kabelrohrschellen müssen Löcher von 6 mm Durchmesser gebohrt werden, so dass sich die Aluminiumrundstäbe hindurchstecken lassen.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2949-576x384.jpg>]

Loch in Kabelrohrschelle

Schritt 3: Zentrieren von Direktoren und Reflektor in den Kabelrohrschellen

Die in Schritt 1 gekürzten Direktoren von 96 cm und 91 cm Länge sowie der ungekürzte Reflektor von 100 cm Länge werden durch die in Schritt 2 gebohrten Löcher dreier Kabelrohrschellen gesteckt, zentriert, und ggf. fixiert, falls diese nicht aufgrund von Reibung selbst halten.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2952-576x384.jpg>]

Reflektor und Direktoren in Kabelrohrschellen gesteckt und anschließend zentriert

Schritt 4: Vorbereiten des Anschlussmaterials

Der Anschluss des Erregers kann auf unterschiedliche Arten realisiert werden. In diesem Beispiel verwenden wir eine PL-Buchse mit kurzen Kabeln und verbinden diese mit den zwei Quetschkabelschuhen mit Öse. Auch andere Formen der Befestigung sind denkbar (ergeben dann aber später ggf. eine leicht andere Verkürzung des Erregers in Schritt 9).

Wir bringen zuerst ein Kabel am Innenleiter der Buchse an und an dessen anderem Ende einen Quetschkabelschuh.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2961-576x384.jpg>]

Befestigung des ersten Kabelschuhs mit einer Crimpzange. An den Innenleiter der Buchse ist vorher ein geeignetes, kleines Kabelstück anzulöten.

Damit sich der zweite Kabelschuh leichter crimpen lässt, können wir den Ring, der den Massekontakt erzeugt, vorübergehend von der PL-Buchse abschrauben.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2973-576x384.jpg>]

PL-Buchse mit abgeschraubtem Massekontakt

Bei der Konstruktion sollten wir darauf achten, dass die Quetschkabelschuhe später einen geeigneten Abstand haben, so dass wir diese später an der Kabelrohrschele für den Erreger befestigen können.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2975-576x384.jpg>]

Geeigneter Abstand der Quetschkabelschuhe für eine spätere Befestigung

Bei einer Speisung mit Koaxialkabel sollte der Speisepunkt mit einem Strombalun symmetriert werden. Hierzu werden wir später eine [Mantelwellensperre von dx-wire.de](#) benutzen, aber auch andere Methoden sind denkbar.

Schritt 5: Vorbereiten der beiden Erregerteile

Um die beiden in Schritt 1 hergestellten Erregerteile mit Schrauben in der verbliebenen vierten Kabelrohrschele befestigen zu können, bohren wir kleine Löcher in ein Ende eines jeden Erregerteils.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2979-576x384.jpg>]

Bohren kleiner Löcher in die Erregerteile, um diese später mit geeigneten Schrauben befestigen zu können

Die Löcher müssen so platziert werden, dass sich die beiden Teile später bei der Befestigung in der Kabelrohrschele nicht berühren.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2988A-576x384.jpg>]

Die Löcher sind so platziert, dass sich die beiden Erregerteile nicht berühren und hinreichend Abstand haben.

Schritt 6: Konstruktion des Erregers

Die in Schritt 5 vorbereiteten Erregerteile werden von unterschiedlichen Seiten in das Loch der verbliebenen vierten Kabelrohrschele gesteckt und dann mit Schrauben gleichzeitig fixiert und mit den Kabelschuhen des Anschlusses verbunden.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2990-576x384.jpg>]

Verbinden von Erregerstäbchen, Kabelrohrschele und Anschluss

Die Gesamtkonstruktion sieht prinzipbedingt etwas schief aus. Dies schränkt die Funktionalität jedoch nicht ein. Auch ein leicht schiefer Erreger ist bei dieser Konstruktion nicht immer zu vermeiden aber sollte das SWR und die Abstrahlcharakteristik nicht nennenswert beeinflussen.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-2991-576x384.jpg>]

Der fertige Erreger samt Anschluss. Achtung: Bei dieser Konstruktion fehlt noch eine Symmetrierung, die wir später ergänzen!

Falls bessere Wetterfestigkeit gewünscht wird, ist der Anschluss entsprechend anders zu gestalten oder entsprechend zu schützen.

Schritt 7: Anbringen und Ausrichten der Elemente

Die vier Elemente (Reflektor, Erreger und die beiden Direktoren) sind mit den folgenden Abständen auf dem Boom zu montieren:

- Abstand Reflektor zu Erreger: 39,9 cm
- Abstand Erreger zu 1. Direktor: 21,7 cm
- Abstand 1. Direktor zu 2. Direktor: 34,8 cm

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3037-576x384.jpg>]

Mit etwas Druck lassen sich die Kabelrohrschele am Rohr befestigen. Isolierband an den richtigen Stellen hilft bei der Positionierung und sorgt darüber hinaus für etwas mehr Festigkeit.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3040-576x384.jpg>]

Auf dem Boom montierte, jedoch noch nicht verdrehte Elemente

Anschließend sind die Elemente (ausgehend von der Blickrichtung in Senderichtung) gegenüber dem Erreger wie folgt zu rotieren:

- Reflektor: 28° gegen den Uhrzeigersinn
- 1. Direktor: 33° mit dem Uhrzeigersinn
- 2. Direktor: 57° mit dem Uhrzeigersinn (das entspricht den 33° vom 1. Direktor zzgl. weiterer 24°)

Hierdurch ergibt sich eine rechtshändige zirkuläre Polarisation.

Sofern kein geeignetes Instrument zum Messen der Winkel vorhanden ist, lassen sich rechteckige Dreiecke aus Pappe ausschneiden, die den entsprechenden Winkel aufweisen. Hierzu lassen sich folgende Kathetenlängen (also Längen der beiden Seiten, die an den rechten Winkel eines rechtwinkligen Dreiecks angrenzen) verwenden:

- Rotation zwischen Erreger und Reflektor: a = 17,7 cm, b = 9,4 cm (entspricht 28°)
- Rotation zwischen 1. Direktor und Erreger: a = 16,8 cm, b = 10,8 cm (entspricht 33°)
- Rotation zwischen 2. Direktor und 1. Direktor: a = 18,1 cm, b = 8,3 cm (entspricht 24°)

Die Länge der längsten Seite (also der dem rechten Winkel gegenüberliegenden Seite) beträgt in diesen Fällen stets 20 cm.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3035-576x384.jpg>]

Konstruktion einer Hilfsschablone zum Ausrichten der Elemente

Somit lassen sich die Elemente leicht ausrichten.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3043-576x384.jpg>]

Ausrichten der Drehposition der Elemente

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3050-576x384.jpg>]

Die verdrehten Elemente auf dem Boom

Auch hier sollten eventuell Maßnahmen gegen unbeabsichtigtes Verrutschen getroffen werden, sofern die Haftreibung nicht ausreichend ist, um ein Verrutschen oder Verdrehen der Elemente zu verhindern.

Falls die Antenne nicht dauerhaft installiert werden soll, kann es sich als hilfreich erweisen, wenn die Konstruktion zerlegbar bleibt, da die Twisted-Yagi trotz ihrer einfachen Konstruktion und der vergleichsweise kleinen Abmessungen im

zusammengebauten Zustand deutlich sperriger ist.

Schritt 8: Anschluss der Antenne (ggf. mit Mantelwellensperre)

Zur Symmetrierung verwenden wir zum Anschluss der Antenne eine Mantelwellensperre (hier: [Standardmantelwellensperre von DX-Wire](#)). Andere Formen der Symmetrierung sind natürlich auch möglich; so hätten wir auch z.B. in Schritt 4 den Einbau einer entsprechenden Drossel vor der PL-Buchse vornehmen können.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3053-576x384.jpg>]

Angeschlossene Mantelwellensperre

Schritt 9: Bestimmen des SWR und ggf. Kürzen des Erregers

Die ggf. noch notwendige Verkürzung des Erregers fällt je nach konkreter Ausführung der Einspeisung leicht unterschiedlich aus. Eine Messung des SWR in Abhängigkeit von der Frequenz kann uns sagen, ob der Erreger noch gekürzt werden muss.

Obwohl die Antenne für 144 bis 146 MHz berechnet wurde, sollte das SWR auf 144 MHz (und nicht auf die Bandmitte von 145 MHz) optimiert werden, da bei 144 MHz auch das theoretische SWR-Minimum der berechneten Konstruktion liegt und so ein Kompromiss aus guter Richtcharakteristik und niedrigem SWR im gesamten Band (bis 146 MHz) erreicht werden kann.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3054-576x384.jpg>]

Messung des SWR bei 50 Ohm in Abhängigkeit von der Frequenz (hier mit dem [RigExpert AA-600](#))

Hier ergab die Messung des SWR über die Frequenz, dass das minimale SWR bei einer Frequenz von knapp unter 142 MHz erreicht wird, was noch zu niedrig ist. Der Erreger muss daher solange gekürzt werden, bis das Minimum bei 144 MHz liegt.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3065-576x384.jpg>]

Nachträgliches Kürzen des Erregers. Beide Seiten sollten gleichmäßig gekürzt werden.

Insgesamt war eine Kürzung von 12 mm je Seite nötig um die Frequenz mit minimalem SWR von 142 auf 144 MHz anzuheben. Es empfiehlt sich, den Erreger zunächst in kleinen Schritten (aber immer auf beiden Seiten gleichzeitig) zu kürzen und zwischendurch eine erneute Messung vorzunehmen.

Steht kein geeignetes Messgerät zur Verfügung, und wird die Einspeisung wie in diesem Artikel beschrieben realisiert, kann auch ohne Messgerät von einer Kürzung beider Erregerteile um jeweils 12 mm ausgegangen werden. (Diese kann dann auch bereits in Schritt 1 vorgenommen werden.)

Die fertige Antenne hat im gesamten 2-Meter-Amateurfunkband ein SWR von maximal 1,6.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3066-576x384.jpg>]

SWR-Verlauf der fertigen Antenne (hier gemessen von 137 bis 153 MHz)

RHCP und LHCP

Die oben beschriebene Antenne weist eine rechtshändig-zirkuläre Polarisation (RHCP) auf. Um hieraus eine linkshändige zirkuläre Polarisation (LHCP) zu machen, ist die Antenne einfach spiegelverkehrt zu konstruieren bzw. aufzubauen; d.h. dort wo Elemente im Uhrzeigersinn verdreht werden, sind diese entsprechend gegen den Uhrzeigersinn zu drehen und umgekehrt.

Die fertige Antenne und ein erster Empfangsversuch mit Oscar 92

Am späten Abend des 9. Juli 2019 habe ich die Antenne gemeinsam mit DL1PZ erfolgreich mit dem Empfang des [Fox-1D \(AMSAT-OSCAR 92\)](#) auf 145,880 MHz (\pm Dopplershift) testen können. Um den Dopplereffekt zu kompensieren, wählten wir zum Aufgang des Satelliten zunächst eine um 2,5 kHz höhere Empfangsfrequenz, in der zeitlichen Mitte des Überflugs die Nennfrequenz von 148,880 MHz und am Ende des Zeitfensters eine um 2,5 kHz niedrigere Frequenz zum Empfang. Bei frequenzmodulierter Sprache (12,5 kHz Kanalbandbreite) lässt sich im 2-Meter-Band der Dopplereffekt zwar auch vernachlässigen, aber wir wollten ein möglichst gutes Signal erhalten. Mit der Twisted-Yagi war der Satellit ab ca. 10° Elevation deutlich zu hören. Erwartungsgemäß spielte eine Drehung der Antenne um die Empfangsachse keine Rolle für die Signalstärke.

Als Empfänger verwendeten wir ein [Baofeng UV-5R](#), festgeklebt am Boom.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-construction-3073-576x384.jpg>]

Fertige Twisted-Yagi-Antenne für das 2-Meter-Band mit angeschlossener Mantelwellensperre und Baofeng UV-5R Transceiver

Wir waren überwältigt von den vielen Funkamateuren, die den Satelliten gearbeitet hatten. Nicht alle Funkamateure schienen einen guten Uplink zu haben, denn während

einige Signale stark verrauscht waren, kamen andere Signale sehr klar an. Unsere Empfangsantenne leistete also gute Arbeit.

Probleme machte uns allerdings das UV-5R beim Empfang, denn es schaltete trotz einwandfreiem Signal und ausgeschaltetem Squelch gelegentlich stumm. Dieses Problem hatte nichts mit der Antenne zu tun: Wir konnten es auf die sogenannte [Squelch Tail Elimination \(STE\)](#) des UV-5R zurückführen. Dieses schaltet beim Empfang für etwa eine Sekunde stumm, wenn ein 55 Hz oder 134,4 Hz Subton empfangen wird. Diese Funktion soll normalerweise das Rauschen am Ende eines Durchgangs unterdrücken. Ob diese mutmaßlich empfangenen Subtöne von den Gegenstellen ausgelöst wurden oder es sich hierbei um einen Nebeneffekt des dem Sprachsignal unterlegten, gleichzeitig auf der selben Frequenz ausgesendeten [Low-Speed Datensignal \(Data Under Voice, DUV\)](#) handelt, wissen wir nicht. In jedem Falle macht es einen Empfang mit dem Baofeng UV-5R lästig, denn die STE-Funktion lässt sich beim UV-5R nur sendeseitig, nicht jedoch empfangsseitig dauerhaft abschalten. Lösen lässt sich das Problem nur temporär durch einen dauerhaften Druck auf die Monitor Taste an der Seite des Gerätes, was den Squelch sicher deaktiviert, solange wie die Taste gedrückt war.

Duplexbetrieb mit zusätzlicher UHF-Antenne

Die meisten FM-Repeater auf Satelliten arbeiten cross-band, d.h. sie empfangen auf UHF und senden auf VHF, oder umgekehrt. Teilweise kommt auch SHF zum Einsatz. Um ein QSO über einen FM-Repeater im Orbit abzuwickeln, war es also nötig, eine zweite Antenne zu bauen. Ich berechnete eine zweite Twisted-Yagi, diesmal mit 5 Elementen und für das 70-cm-Band.

Als Drehwinkel gab ich $22,5^\circ$ vor, da sich diese Werte auch etwa bei Vorabsimulationen von 5-elementigen Antennen ergeben hatten und die Antenne so einfacher auszurichten ist. Die vorläufigen Abmessungen (später noch verbessert, siehe weiter unten im Text) lauteten wie folgt:

- Länge Reflektor: 34,0 cm
- Länge Erreger: $2 \times 16,2$ cm berechnet, anschließend jedoch um ca. jeweils 12 mm auf je 15 cm gekürzt
- Länge 1. Direktor: 30,4 cm
- Länge 2. Direktor: 29,9 cm
- Länge 3. Direktor: 28,6 cm
- Abstand Reflektor zu Erreger: 11,7 cm
- Abstand Erreger zu 1. Direktor: 8,6 cm
- Abstand 1. Direktor zu 2. Direktor: 14,3 cm
- Abstand 2. Direktor zu 3. Direktor: 15,0 cm
- Drehwinkel zwischen allen Elementen jeweils $22,5^\circ$

Gemeinsam mit DL1PZ baute ich auch diese Antenne. Als Mantelwellensperre benutzten wir hier abweichend direkt auf ein angeschlossenes RG-8/RG-213-Kabel aufgezogene Ferritkerne des Typs [CST19/11/12-3S4](#) von Ferroxcube. (Anmerkung: Das Material 3S4 dieses Ferritkerns ist laut [Datenblatt](#) für die Mantelwellenunterdrückung nur bis 300 MHz „optimiert“. Da die Antenne niederohmig gespeist wird und 4 Kerne sowohl im 2-m-Band als auch im 70-cm-Band etwa eine Impedanz von 300 Ohm aufweisen, sollten diese bei niedrigen Leistungen jedoch ausreichen.)

Am folgenden Tag, den 13. Juli 2019, gelang uns ein erstes QSO über den Satelliten [Saudi-OSCAR 50 \(Saudisat C1\)](#) um 10:34 UTC. Wir hatten eigentlich nicht mit einer Antwort gerechnet, denn wir konnten unser eigenes Signal nicht über den Satelliten hören. Grund war, dass die von uns verwendeten Baofeng-UV-5R-Transceiver über eine schlechte Großsignalfestigkeit verfügen und wir beim Senden unseren eigenen Empfang störten. Da wir diesen Umstand nicht bedacht hatten, waren wir umso überraschter, als [2M0SQL](#) plötzlich Björns Rufzeichen, DL1PZ, wiederholte und uns einen Rapport von 59 gab.

An die Betriebstechnik auf Satelliten muss man sich zunächst etwas gewöhnen. Es finden oft mehrere QSOs parallel statt, d.h. es ist durchaus damit zu rechnen, dass nachdem einer Station geantwortet wurde, erst einmal andere Stationen ihre QSOs fortsetzen bis der eigene Gesprächspartner wieder antworten kann. Die kurzen Überflugzeiten von rund 10 Minuten treiben zu kurzen, schnellen Durchgängen an; neben Rufzeichen und Rapport wird in der Regel nicht viel mehr als der Locator übermittelt. Das Tempo war zumindest für uns als Anfänger mitreißend und sorgte für einen konstant hohen Adrenalinpegel.

Viele Satelliten haben einen UHF-Uplink und einen VHF-Downlink. Beim Saudisat C1 ist dies jedoch umgekehrt. Als Sendeantenne verwendeten wir also die Twisted-Yagi für das 2m-Band und als Empfangsantenne die Twisted-Yagi für das 70-cm-Band.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-uhf-576x384.jpg>]

Die Twisted-Yagi für das 70-cm-Band mit 5 Elementen

Danke auch an dieser Stelle an [2M0SQL](#) für unser erstes Satelliten-QSO!

Weitere Optimierung der UHF-Antenne

Die oben beschriebene und von uns gebaute und getestete UHF-Antenne wies nach Messungen leider nur ein SWR von etwa 1:2,0 auf. Auch wenn dies bei den für Satellitenbetrieb verwendeten Leistungen kein Problem darstellt, habe ich mir Gedanken gemacht, wie dies noch verbessert werden könnte.

Das etwas schlechtere SWR bei der UHF-Antenne ist darauf zurückzuführen, dass die Einspeisung nicht exakt am Erreger erfolgt, sondern die Kabelschuhe mit Leiter eine kurze Parallelführung darstellen, welche eine zusätzliche Verkürzung des Erregers notwendig macht. Im VHF Bereich ist diese Art der Anpassung ein kleineres Problem, da dort die Abmessungen der Schrauben und Kabelschuhe im Vergleich zur Wellenlänge noch relativ klein sind. Bei UHF gilt dies aber nicht mehr.

Aus diesem Grunde habe ich die UHF-Antenne noch einmal neu berechnet – mittels Einbeziehung einer etwa 3 cm langen Einspeisung von leicht auseinander laufenden Drähten in die Simulation.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-feed-simulation.png>]

Aufbau der UHF-Antenne in der NEC-Simulation, hier einschließlich besser modellierter Einspeisung

Die neuen Werte, welche die oben beschriebene Einspeisung berücksichtigen, lauten wie folgt:

- Länge Reflektor: 33,7 cm
- Abstand der beiden Enden des Erregers: 31,1 cm, nach Messung auf 29,8 cm gekürzt
- Länge 1. Direktor: 30,1 cm
- Länge 2. Direktor: 30,3 cm
- Länge 3. Direktor: 29,2 cm
- Abstand Reflektor zu Erreger: 14,8 cm
- Abstand Erreger zu 1. Direktor: 8,9 cm
- Abstand 1. Direktor zu 2. Direktor: 14,5 cm
- Abstand 2. Direktor zu 3. Direktor: 12,9 cm
- Drehwinkel zwischen allen Elementen jeweils 22,5°

Die Messung zeigt nun auch ein besseres SWR von unter 1:1,5 im ganzen 70 cm Band:

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/07/twisted-yagi-uhf-swr-576x384.jpg>]

Verlauf des Stehwellenverhältnisses der verbesserten Twisted-Yagi für UHF

Der Gewinn bei 435 MHz beträgt rechnerisch 9,05 dBi, zu beinahe 100% rechtszirkulär (bzw. linkszirkulär, je nach Drehung der Elemente).

Zusammenfassung und Ausblick

Antennen mit zirkulärer Polarisation haben den Vorteil, dass diese beliebig um die Sende- bzw. Empfangsachse gedreht werden können, ohne dass es zu polarisationsbedingtem Fading kommen kann. Dies gilt auch für den Fall, dass die Gegenseite linear polarisiert; in diesem Falle kommt es jedoch zu einer zusätzlichen Dämpfung von konstant 3 dB (unabhängig von der Drehposition der eigenen Antenne bzw. Ausrichtung der linearen Polarisation der Gegenstelle).

Die Twisted-Yagi stellt eine interessante alternative Bauform zum Senden und Empfangen zirkulär polarisierter Funkwellen dar. Da sie weder Verzögerungsleitungen noch eine aufwendige Helixkonstruktion braucht, ist sie schnell und einfach zusammengebaut. Die Speisepunktimpedanz kann mittels Computeroptimierung direkt auf nahezu 50 Ohm angepasst werden und das Richtdiagramm kann nebenkeulenfrei gestaltet werden.

Trotz ihrer einfachen Bauweise scheint die Twisted-Yagi bisher noch wenig Verbreitung gefunden zu haben. Es sind wenig Informationen zu dieser Bauform verfügbar. Dies könnte daran liegen, dass die Optimierung besonderer Abwägungen bedarf (siehe Abschnitt Computersimulation) und die zusätzliche Drehung des ggf. vorhandenen Reflektors und der Direktoren die Berechnung verkompliziert. Es wäre schön, weitere Erfahrungen mit dieser bisher eher exotischen Antennenform zu sammeln, so dass wir sie vielleicht bald öfters im Bereich des Amateurfunks und der Satellitenkommunikation antreffen werden.

Dieser Artikel erschien zuerst im August 2019 in der gedruckten Ausgabe unseres Magazins.

Alles anzeigen

Quelle: <https://www.hamspirit.de/11230...che-twisted-yagi-antenne/>