

Messungen der Strahlungseigenschaften von POTY-Antennen bei 2.4 GHz

Reinhard Noll, DF1RN, noll.reinhard@arcor.de

Einleitung

Im Frühjahr 2020 haben sich aus unserem OV Aachen, G01, Manfred, DH0KAI, Dirk, DK4WK und ich entschieden, für den uplink zum Amateurfunksatelliten QO-100 eine Patchantenne mit der Bezeichnung POTY zu bestellen [1, 2]. Nach dem Aufbau und ersten praktischen Tests dieser Antenne, sollen deren Eigenschaften im S-Band bei 2.4 GHz messtechnisch näher untersucht werden.

Bild 1 zeigt die Vorder- und Rückseite der aufgebauten Patchantenne. Die abgeschrägten Ecken des Strahlers sind so ausgeführt, dass zwei Schwingungsmoden gleichzeitig angeregt werden (TM₀₁, TM₁₀), um eine links zirkular polarisierte Welle zu erzeugen. In Ausbreitungsrichtung blickend dreht sich dabei der elektrische Feldstärkevektor gegen den Uhrzeigersinn; sog. LHCP – left hand circular polarization. Für die im Weiteren vorgestellte Messung der Strahlungseigenschaften ist die Drehorientierung der Antenne um ihre Längsachse (das zentral angeordnete Kupferrohr) festzulegen. Dazu dient die Pfeilmarkierung (siehe Bild 1, links, oben). Zudem werden die aufgebauten Antennen jeweils eindeutig auf der Rückseite der Massefläche gekennzeichnet (s. Bild 1, rechts, "DF1RN, 7/2021"). Die Antennen werden wie aufgebaut vermessen ohne weitere Optimierungsschritte.

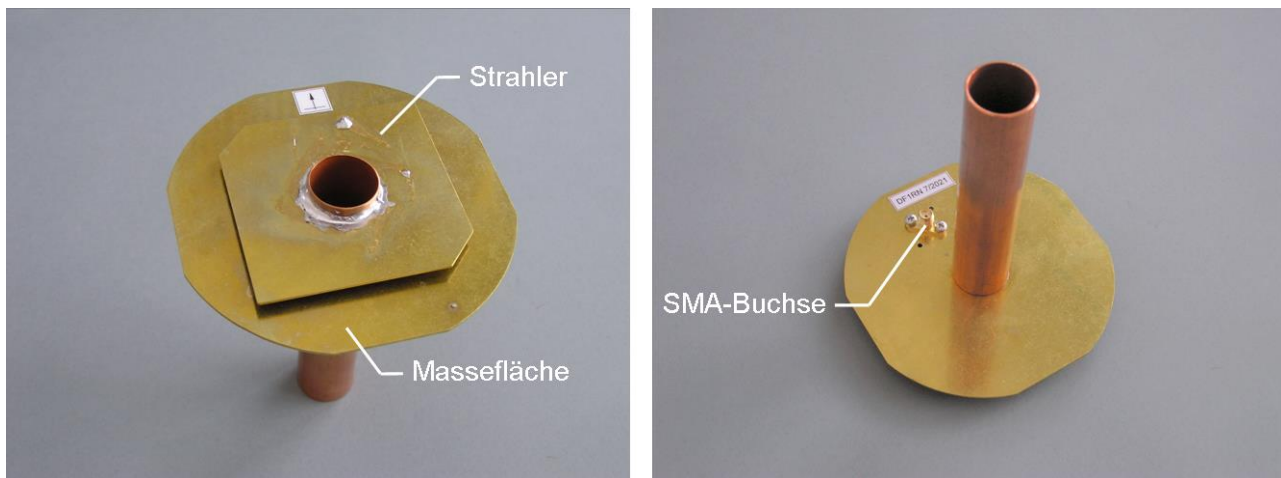


Bild 1: Vorder- (links) und Rückseite (rechts) der Patchantenne POTY [1]. Massefläche und Strahler bestehen aus Messingblechen, die auf das zentrale Kupferrohr gelötet werden. Das Kupferrohr dient als Hohlleiter für den Downlink bei ca. 10.50 GHz. Der Durchmesser des Hüllkreises der als Reflektor wirkenden Massefläche beträgt 105 mm. Die Patchantenne wird von der Rückseite über eine SMA-f Buchse gespeist (rechts)

Für die Speisung der Antennen sollen möglichst dämpfungsarme, nicht zu lange Koaxialkabel verwendet werden. Die Länge sollte gerade so groß gewählt werden, dass Messungen im Fernfeld der Antennen möglich sind. Die Entscheidung fiel auf die Koaxialkabel CLF-240 (Batronix) und RG 223/U (Huber u. Suhner), jeweils mit einer Länge von ca. 2 m. Zum Teil sind Dämpfungswerte für 2.4 GHz für diese Kabel angegeben. Mit dem Netzwerkanalysator VNWA (Version 2.6, SDR-Kits, DG8SAQ) kann zwar nur bis 1.3 GHz gemessen werden, dennoch können die damit ermittelten Werte über die bekannte Skalierung der Dämpfung mit der Frequenz (proportional zur Wurzel aus der Frequenz aufgrund des Skineffekts) extrapoliert werden. Bild 2 zeigt die gemessenen Dämpfungswerte dargestellt in dB/100 m für CLF-240 (Dreiecke) und RG 223/U (Kreise) als Funktion

der Frequenz aus Messungen des Vorwärtsübertragungsfaktors S_{21} . Zum Vergleich sind Dämpfungswerte aus früheren Messungen für das Koaxialkabel UltraFlex 7 ebenfalls eingezeichnet (Quadrate) [3].

In der gewählten doppellogarithmischen Darstellung von Bild 2 ist die durchgezogene Kurve eine Potenzfunktion mit dem Exponenten 0.5, die an die Messwerte für das CLF-240 Koaxialkabel im Frequenzbereich bis 900 MHz angepasst wurde. Danach wäre für dieses Kabel bei 2.4 GHz eine Dämpfung von 49.2 dB/100 m zu erwarten (Kreuz).

Für das RG 223/U Koaxialkabel ergibt sich entsprechend eine extrapolierte Dämpfung bei 2.4 GHz von 68.2 dB/100 m, siehe Sechseck am Ende der Fitkurve in Bild 2. Für das Huber und Suhner Kabel werden Spezifikationen bei 2.4 GHz angegeben, die offenbar konservativ angesetzt sind und noch über diesem Wert liegen [4]: 76 dB/100 m.

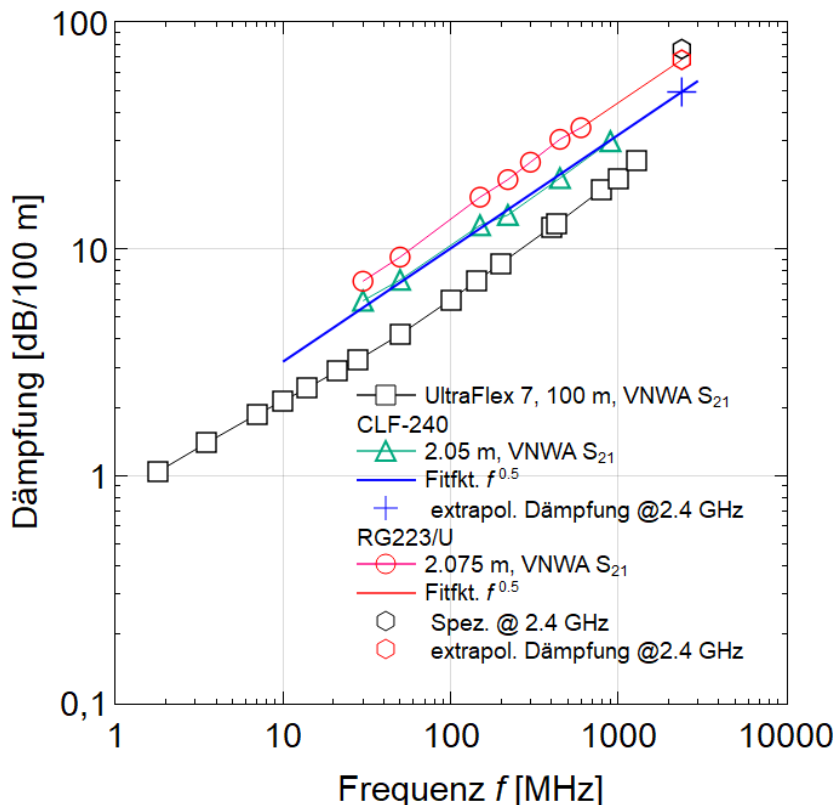


Bild 2: Mit dem VNWA gemessene Dämpfung der Koaxialkabel CLF-240, RG 223/U und zum Vergleich UltraFlex 7 bei Frequenzen bis 1 GHz und extrapolierte Dämpfung für CLF-240 (Kreuz) und RG 223/U bei 2.4 GHz (Sechseck am Ende der durchgezogenen Fitkurve)

Für die in den weiteren Messungen verwendeten Längen sind also folgende Dämpfungswerte anzusetzen: a) CLF-240, 2.05 m x 49.2 dB/(100 m) = 1.0 dB; b) RG 223/U, 2.075 m x (68.2 bis 76) dB/(100 m) = 1.41 dB bis 1.58 dB, näherungsweise wählen wir den Mittelwert davon und runden auf eine Nachkommastelle: 1.5 dB. Diese Dämpfungen sind bei der Messung der Rückflussdämpfung, des Stehwellenverhältnisses und des Gewinns der Antennen zu berücksichtigen.

Rückflussdämpfung und Stehwellenverhältnis

Für die Antennenmessungen steht uns leihweise der Netzwerkanalysator ZVH4 von Rohde & Schwarz zur Verfügung, der einen Frequenzbereich von 100 kHz bis 3.6 GHz abdeckt. Mit diesem Gerät kann natürlich die Kabeldämpfung auch direkt gemessen werden. Dazu werden das CLF-240 und das RG 223/U Kabel hintereinandergeschaltet und sowohl der Vorwärtstransmissionsfaktor als auch der Rückwärtstransmissionsfaktor gemessen: $S_{21} = 2.20$ dB und $S_{12} = 2.35$ dB. Nehmen wir den Mittelwert davon, so resultiert: 2.27 dB. Das weicht von der Auswertung der VNWA-Messungen nur um 0.23 dB ab.

Jede POTY-Antenne wird auf einem Fotostativ in einer Höhe von 1.025 m über dem Fussboden in horizontaler Lage auf einer Trägerplatte aus Holz montiert, siehe Bild 3. Auf der Trägerplatte sind zwei Holzleisten gelemmt zwischen denen die Antenne drehbar gelagert und per Kabelbinder an Ösen fixiert werden kann. Mit Hilfe einer aufgelegten Kreuzlibelle wird die horizontale Ausrichtung der Trägerplatte am Stativ eingestellt. Eine kleine Kabelschelle fixiert die Anschlussleitung. Die Messungen erfolgen in einem ca. 30 qm großen Wohnraum in Holzbauweise. Das ist sicher keine ideale Messumgebung wie in einem HF-Messraum mit Absorberflächen an den Wänden, dennoch können damit – wie im weiteren gezeigt wird – stabile und plausible Antennenmessungen im Fernfeld durchgeführt werden.

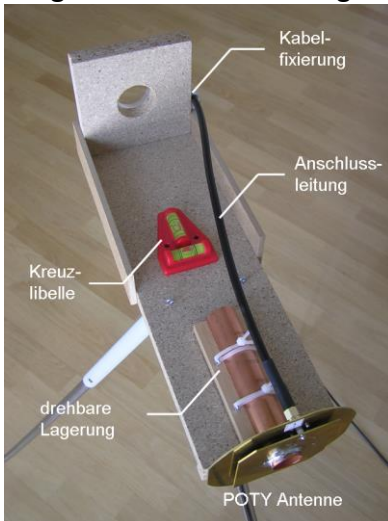


Bild 3: POTY Antenne montiert auf einer Trägerplatte aus Holz, die von einem Fotostativ gehalten wird

Im ersten Schritt wird das Stehwellenverhältnis und die Rückflusssdämpfung S_{11} bei 2.40 GHz mit dem ZVH4 für beide Antennen gemessen. Dazu wird eine volle Eintorkalibrierung des ZVH4 mit der CLF-240 Leitung auf das Kabelende durchgeführt (mit SMA Kalibrierelementen für *short* und *load*). Bild 4 zeigt beispielhaft das Stehwellenverhältnis VSWR im Frequenzbereich von 2.250 GHz bis 2.750 GHz für die POTY Antenne von Bild 1, die am Ende der CLF-240 Koaxialleitung angeschlossen ist. Bild 5 zeigt die gemessene Rückflusssdämpfung S_{11} .

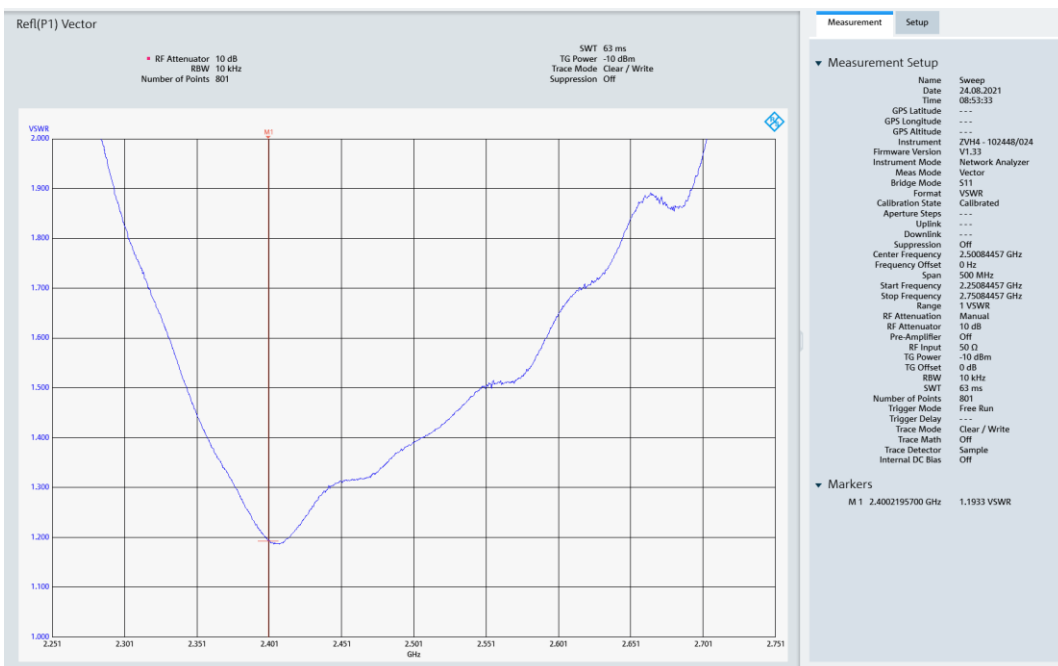


Bild 4: Stehwellenverhältnis VSWR der POTY-Antenne von Bild 1 (DF1RN, 7/2021) angeschlossen über das CLF-240 Koaxialkabel (ca. 2 m) am Netzwerkanalysator. An der Markerposition M1 bei 2.4 GHz (dickere vertikale Linie) ist $VSWR = 1.19$



Bild 5: Rückflussdämpfung S_{11} der POTY-Antenne von Bild 1. Bei 2.4 GHz ist $S_{11} = -21.1$ dB

In Tab. 1 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Bei einem Stehwellenverhältnis von 1.19 erreichen über 99 % der zufließenden HF-Leistung die Antenne.

Tab. 1: Messergebnisse des Stehwellenverhältnisses (VSWR) und der Rückflussdämpfung (S_{11}) für beide POTY-Antennen bezogen auf den Speisepunkt (SMA-Buchse)

Antenne	VSWR	S_{11} [dB]
POTY 1, DF1RN	1.19	-21.1
POTY 2, DH0KAI	1.21	-20.4

Messung des Antennengewinns

Für die Messung des Antennengewinns wird der in Bild 6 dargestellte Aufbau verwendet (keine maßstäbliche Darstellung). Beide POTY Antennen sind jeweils auf einem Fotostativ und einer Holzplattform montiert (vgl. Bild 3). Der senkrechte Abstand zwischen den beiden Strahlerflächen wird mit d bezeichnet. Der Abstand soll so groß gewählt werden, dass wir im Fernfeld (Fraunhofer-Zone) messen. Für sogenannte lange Antennen liegt das Fernfeld vor, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$d \geq \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (1)$$

mit L charakteristische Abmessung der strahlenden Antenne, λ Wellenlänge. Die Kantenlänge des Patches der POTY-Antenne beträgt $L = 6.55$ cm (s. Bild 6). Damit folgt: $d > 6.9$ cm. Für kurze Antennen liegt ein Fernfeld vor, wenn gilt:

$$d \geq 2\lambda. \quad (2)$$

Mit der Wellenlänge von 12.5 cm folgt: $d \geq 25$ cm. Wir wählen im Weiteren mindestens einen Abstand von 1 m, so dass die Bedingungen (1), (2) sicher erfüllt sind.

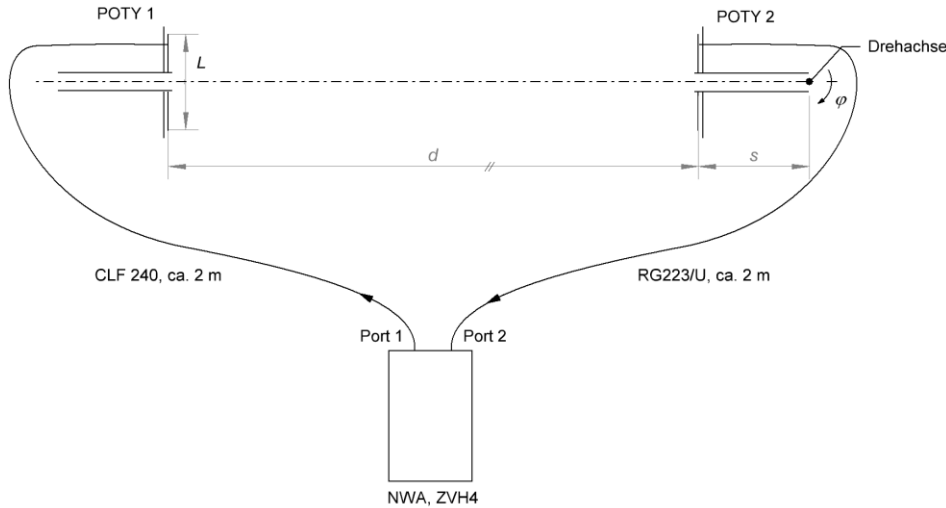


Bild 6: Aufbau zur Messung des Antennengewinns und der Strahlungscharakteristik im Fernfeld. Beide Antennen sind jeweils auf einem Fotostativ montiert und für die Messung des Antennengewinns so ausgerichtet, dass der Hohlleiter (Kupferrohr) horizontal liegt und die Mittelachsen der Hohlleiter der beiden Antennen fluchten (siehe strich-punktierte Linie). Die Patch-Antenne steht senkrecht auf dieser Verbindungsachse. Die Sendeantenne wird als POTY 1 bezeichnet, die Empfangsantenne als POTY 2. Für die Messung des Strahlungsdiagramms wird die Empfangsantenne POTY 2 um den Winkel φ gedreht. d Abstand zwischen den aktiven Antennenflächen, s Abstand zwischen der Drehachse der Empfangsantenne und der Strahlerfläche

Das Ergebnis einer S_{21} -Messung für einen Abstand von $d = 1.48$ m ist: $S_{21}^m = -27.7$ dB (der Index m zeigt an, dass dies die gemessene Vorwärtstransmission ist).

Zwischen empfangener und gesendeter Leistung gilt die Friis-Übertragungsgleichung [5, 6]:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3)$$

mit P_r , P_t empfangene/gesendete Leistung; G_t , G_r Gewinn der Sende-/Empfangsantenne; d Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne. Wenden wir den Logarithmus auf beiden Seiten an und multiplizieren das Ergebnis mit 10 so erhalten wir aus (3):

$$10 \log \frac{P_r}{P_t} = 10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log \frac{\lambda}{4\pi d}. \quad (4)$$

Weiterhin nehmen wir an, dass $G_t = G_r = G$ gilt – da die Antennen identisch aufgebaut sind – so folgt aus (4):

$$10 \log G = 0.5 \left(10 \log \frac{P_r}{P_t} - 20 \log \frac{\lambda}{4\pi d} \right). \quad (5)$$

In Dezibel ausgedrückt:

$$G_{\text{dB}} = 0.5 \left(S_{21\text{dB}} - 20 \text{ dB} \log \frac{\lambda}{4\pi d} \right). \quad (6)$$

Da wir die Gesamtdämpfung zwischen den Anschlüssen des Netzwerkanalysators gemessen haben ($S_{21\text{dB}}^m$), sind die Kabelverluste (s. Tab. 1, 1 dB + 1.5 dB = 2.5 dB) und die Dämpfung durch die Fehlanpassung der Sende- und Empfangsantenne (s. Tab. 1, VSWR = 1.19 bewirkt eine Dämpfung von 0.03 dB, bei VSWR = 1.21 sind es 0.04 dB) zu berücksichtigen:

$$S_{21\text{dB}} = S_{21\text{dB}}^m + 2.5 \text{ dB}_{\text{Kabel}} + 0.07 \text{ dB}_{\text{VSWR}} = -25.13 \text{ dB}. \quad (7)$$

Damit folgt für den Gewinn einer POTY-Antenne:

$$G_{\text{dB}} = 0.5 (-25.13 \text{ dB} + 43.45 \text{ dB}) = 9.16 \text{ dBi}. \quad (8)$$

Dieser Gewinn bezieht sich auf einen isotropen Strahler (siehe Beziehung (3), letzter Term in der Klammer), daher wird hier das relative logarithmische Maß dBi gewählt. Der ermittelte Gewinn von ca. 9 dBi deckt sich mit Angaben, die zu Patch-Antennen im Internet zu finden sind [7]. Zum Vergleich werden statt der POTY-Antennen zwei Stabantennen (äußere Stablänge 9 cm) verwendet, wie sie häufig für WLAN-Stationen eingesetzt werden. Werden beide Antennen vertikal ausgerichtet, so ergibt sich: $G_{dB} = 1.36 \text{ dBi}$.

Wenn der Öffnungswinkel der POTY-Antenne bekannt ist (s. folgenden Abschnitt zur Messung der Strahlungscharakteristik), kann der Richtfaktor (engl. *directivity*) der Antenne näherungsweise wie folgt berechnet werden [8]:

$$D_{dB} \approx 10 \log \left(\frac{4\pi(180/\pi)^2}{(\Delta\varphi_{-3dB})^2} \right), \quad (9)$$

mit $\Delta\varphi_{-3dB}$ (in Grad) der Halbwertsbreite der Strahlungscharakteristik (s. Bild 10). Für (9) nehmen wir an, dass der Öffnungswinkel in zwei zueinander senkrechten Ebenen gleich groß ist. Die Messergebnisse im folgenden Abschnitt zeigen, dass dies der Fall ist und von einer rotationssymmetrischen Strahlungskeule auszugehen ist. Mit $\Delta\varphi_{-3dB} = 56^\circ$ erhalten wir aus (9):

$$D_{dB} = 11.2 \text{ dBi}. \quad (10)$$

Dieser Wert ist um etwa 2 dB größer als der oben ermittelte Gewinn (8). Das Verhältnis von Gewinn und Richtfaktor gibt den Wirkungsgrad der Antenne an. Dazu berechnen wir zunächst die folgenden Größen:

$$G = 10^{G_{dB}/10} \text{ und } D = 10^{D_{dB}/10}. \quad (11)$$

Umrechnung der Werte (8) und (10) mit (11) ergibt dann für den Wirkungsgrad der Antenne:

$$\eta = G/D = 63 \%. \quad (12)$$

Der Wirkungsgrad wird durch das Verhältnis von Strahlungswiderstand zur Summe aus Strahlungswiderstand und Verlustwiderständen beschrieben:

$$\eta = \frac{R_s}{R_s + R_v}, \quad (13)$$

mit R_s Strahlungswiderstand, R_v Verlustwiderstand. Der Nenner in der Beziehung (13) ist gerade der Realteil des Fusspunktwidestands R_a der Antenne. Eine Messung der Impedanz direkt am Speisepunkt der POTY-Antenne (Kalibrierebene ist das Ende der CLF-240 Leitung) ergibt bei 2.4 GHz: $Z_a = R_a + jX_a = (49.2 - j8.8)\Omega$. Mit (12) und (13) folgt dann für den Strahlungswiderstand der POTY-Antenne: $R_s = 30.8 \Omega$ und für die Verlustwiderstände: $R_v = 18.4 \Omega$.

Messung der Strahlungscharakteristik

Zur Ermittlung der Strahlungscharakteristik wird am Stativ der Empfangsantenne eine Winkelskala angebracht, siehe Bild 7 (mit der Software sPlan von Abacom erstellt). Zwei aufeinander folgende Skalenstriche entsprechen einem Winkelschritt von 2° . Die Antennen werden in gleicher Drehlage ausgerichtet, so dass die Markierungspfeile, siehe Bild 1, links, parallel stehen (im folgenden dafür gewählte Kurzbezeichnung: $\uparrow\uparrow$).



Bild 7: Winkelskala am Stativ der POTY-Empfangsantenne

Bild 8 zeigt einen Blick auf die Empfangsantenne POTY 2.



Bild 8: Blick auf die Empfangsantenne POTY 2. Durch den Hohlleiter ist die Libelle der kleinen Wasserwaage zu erkennen. Der markierte Pfeil zeigt die Drehlage der Antenne, die für die zweite Messreihe verwendet wurde (vgl. Bild 10, rautenförmige Datenpunkte) bei der die Drehlagen von Sende- und Empfangsantenne senkrecht aufeinander stehen ($\uparrow \rightarrow$)

Die Sendeantenne, POTY 1, bleibt fix, wohingegen die Empfangsantenne POTY 2 um die Vertikalachse des Stativs gedreht wird. Positive Winkel φ entsprechen Drehlagen der Empfangsantenne, die nach rechts (Blickrichtung Empfangsantenne zur Sendeantenne) orientiert sind. Negative Winkel entsprechen Drehungen nach links. Bild 9 zeigt beispielhaft einen Screenshot des Spektrumanalysators mit der S_{21} -Kurve für einen Winkel von $\varphi = -30^\circ$. Der gezeigte Sweep-Bereich ist 500 MHz breit, der Marker steht bei 2.40 GHz. Der angezeigte Vorwärtstransmissionsfaktor beträgt -30.48 dB.



Bild 9: Vorwärtstransmissionsfaktor S_{21} im Frequenzbereich von 2.25 bis 2.75 GHz bei einer Winkelstellung der Empfangsantenne von -30°

Da die vertikale Drehachse des Stativs der Empfangsantenne nicht durch die aktive Fläche der Antenne POTY 2 geht, sondern von dieser einen Abstand aufweist (s. Bild 6, $s = 20$ cm) bedingt eine

Winkeländerung der Empfangsantenne auch eine Änderung der Winkellage der Verbindungslinie zwischen Sende- und Empfangsantenne (Sendewinkel). Dieser Einfluss ist allerdings recht klein, da $d \gg s$ gilt.

Bild 10 zeigt das Ergebnis in einem Polardiagramm. Die Maximalwerte der Rohdaten wurden zunächst auf 0 dB reskaliert ($S_{21} \rightarrow S'_{21}$). Sie liegen auf dem äußeren Kreis in Bild 10. Die "-3dB-Linie" ist strich-punktiert eingezeichnet. Die eingezeichneten Schenkel, die etwas innerhalb der $\pm 30^\circ$ Linien liegen, zeigen den Öffnungswinkel an, er beträgt 56° . Die Messung wurde für parallele (Datenpunkte: Kreise) und senkrechte Ausrichtung der Drehlage der beiden Antennen durchgeführt (Datenpunkte: Rauten). Der Verlauf des Strahlungsdiagramms ist nahezu identisch, die Antennen erzeugen also eine näherungsweise ideal zirkular polarisierte Strahlung.

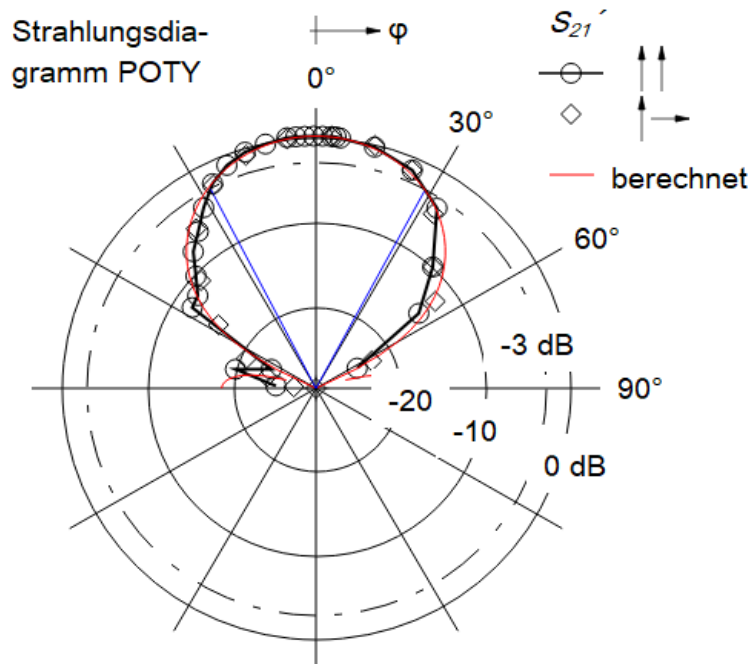


Bild 10: Strahlungsdiagramm der POTY-Antenne bei 2.40 GHz für parallele und senkrechte Drehorientierung (siehe Pfeile sowie runde und rautenförmige Datenpunkte für den reskalierten Vorwärtstransmissionsfaktor S'_{21} (0 dB im Maximum). In beiden Fällen beträgt der Öffnungswinkel 56° . Die mit (14) berechnete Strahlungscharakteristik ist als durchgezogene Kurve eingezeichnet (für $L_{\text{eff}} = 66.6 \text{ mm}$)

$$\Delta\varphi_{-3\text{dB}} = 56^\circ$$

Der zu erwartende Öffnungswinkel der POTY-Antenne soll ergänzend rechnerisch ermittelt werden. Bild 11 zeigt eine Ansicht der POTY-Antenne mit einer Markierung zweier gegenüber liegenden Kanten des Strahlerelements (aufrecht stehende weiße Rechtecke). Diese Kanten des Strahlerelements können als zwei im Abstand L angeordnete Schlitzstrahler betrachtet werden. Das hochfrequente Randfeld des Patches erzeugt die Abstrahlung.

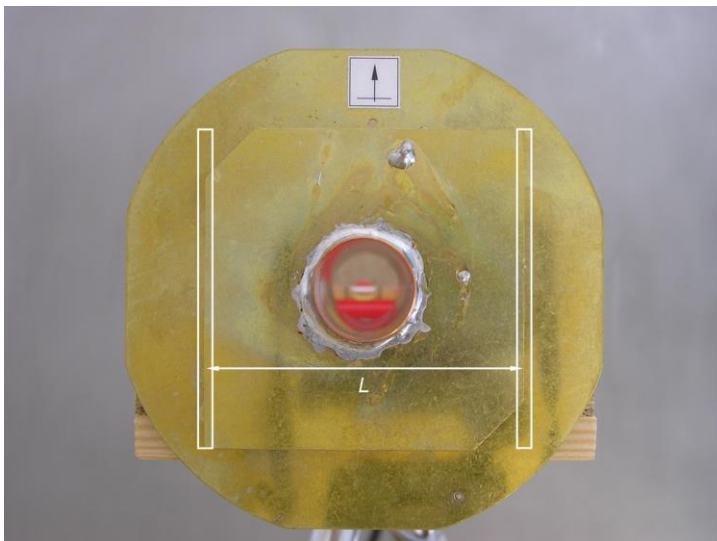


Bild 11: Ansicht der POTY Antenne mit markierten Strahlerkanten (weiße Rechtecke), die als zwei im Abstand L parallel angeordnete Schlitzstrahler betrachtet werden können (hier bezeichnet L die geometrische Breite des Patches)

Diese beiden Schlitzstrahler entsprechend in der Optik der sogenannten Doppelspaltanordnung (Youngscher Doppelspalt) bei der eine ebene kohärente optische Welle die beiden Spalte beleuchtet und das durch die Spalte tretende Licht eine charakteristische Beugungsfigur erzeugt (Beugung am Doppelspalt). Bild 12 illustriert diese Analogie.

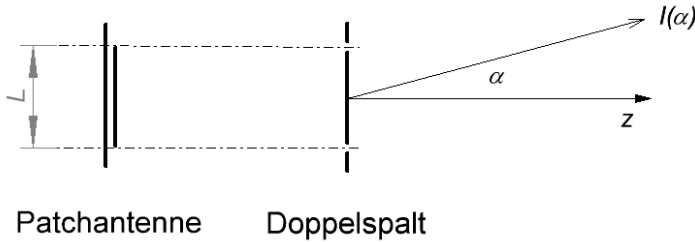


Bild 12: Analogie zwischen Patchantenne (links) und der Beugung am Doppelspalt (rechts)

Für die Winkelabhängigkeit des Strahlungsfeldes kann daher im Fernfeld die in der Optik bekannte Beziehung für die Beugung am Doppelspalt herangezogen werden [9]:

$$I(\alpha) \propto \cos^2\left(\frac{L}{2} k \sin(\alpha)\right), \quad (14)$$

mit L Abstand zwischen den Spalten, $k = 2\pi/\lambda$ Kreiswellenzahl, α Richtungswinkel, siehe Bild 12. Bei dem Richtungswinkel $\alpha = 0^\circ$ nimmt die Intensität nach (14) ein Maximum an. Wir suchen nun denjenigen Winkel, bei dem die Intensität auf 50 % des Maximalwerts abfällt, das entspricht -3 dB:

$$I(\alpha_{-3\text{dB}})/I(0) = 0.5 = \cos^2\left(\frac{L}{2} k \sin(\alpha_{-3\text{dB}})\right), \quad (15)$$

mit $\alpha_{-3\text{dB}}$ halber Öffnungswinkel. Auflösen von (15) nach dem halben Öffnungswinkel führt auf:

$$\alpha_{-3\text{dB}} = \arcsin\left[\frac{2}{kL} \arccos\sqrt{0.5}\right]. \quad (16)$$

Für den zu erwartenden Öffnungswinkel (Index b) erhalten wir damit:

$$\Delta\varphi_{-3\text{dB}}^b = 2\alpha_{-3\text{dB}} = 2 \arcsin\left[\frac{2}{kL} \arccos\sqrt{0.5}\right]. \quad (17)$$

Mit (17) haben wir eine analytische Lösung für den Öffnungswinkel gefunden. Der Öffnungswinkel der Patchantenne hängt nach (17) nur vom Abstand der einander gegenüber liegenden Strahlerkanten (s. Bilder 11, 12) und der Wellenlänge ab. Setzen wir in (17) für $L = 65.5 \text{ mm}$ und für $k = 2\pi/(12.5 \text{ cm})$ ein, so erhalten wir: $\Delta\varphi_{-3\text{dB}}^b \approx 57^\circ$. Dieser Wert kommt dem experimentell bestimmten Öffnungswinkel schon sehr nahe. Bei einer genaueren Betrachtung sollte für L nicht die geometrische Kantenlänge des Patches (65.5 mm), sondern der senkrechte Abstand der Mittellinien der strahlenden Schlitzte verwendet werden. Dieser ist etwas größer anzusetzen, da ja nicht die Kante des Strahlers selbst, sondern das benachbarte Randfeld die Abstrahlung bewirkt. Diese effektive Breite des Patches kann mit einer von Wheeler [10] angegebenen Beziehung berechnet werden. Für eine Dicke des Patches von $t = 1 \text{ mm}$, einer Höhe des Luftzwischenraums zur Masseplatte von $h = 3 \text{ mm}$, folgt für die effektive Breite des Patches: $L_{\text{eff}} = 66.61 \text{ mm}$. Diese Breite ist um etwas mehr als 1 mm größer als die geometrische Breite. Setzen wir L_{eff} in die Beziehung (17) ein, so resultiert: $\Delta\varphi_{-3\text{dB}}^b = 55.96^\circ$. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem gemessenen überein. Der Öffnungswinkel reagiert empfindlich auf die (effektive) Breite des Patches (eine Änderung der Breite um 1 mm ändert den Öffnungswinkel um ca. 1°).

Experimente zur Zirkularpolarisation

Die POTY-Antenne strahlt eine links zirkular polarisierte Welle ab, diese kann von einer baugleichen Antenne auf einer direkten Sichtlinie auch empfangen werden, siehe Bild 6. Anschaulich können wir uns das so vorstellen, dass eine Linksschraube von der Empfangsantenne aus betrachtet auch eine Linksschraube bleibt und daher empfangen werden kann. Anders sieht es bei einer Reflexion der links zirkular polarisierten Welle an einer Metallplatte aus.

Bild 13 zeigt dazu einen experimentellen Aufbau. Die beiden POTY-Antennen werden auf eine Stahlplatte mit den Abmessungen 90 cm x 90 cm so ausgerichtet, dass sie auf einen gemeinsamen Punkt zielen (siehe strich-punktierte Linien in Bild 13). Der gesamte freie Strahlweg hat die Länge, die bereits für die Gain-Messung (vgl. Bild 6) gewählt wurde. Durch die Reflexion entsteht aus der links zirkular polarisierten Welle (LHCP) eine rechts zirkular polarisierte Welle (RHCP). Anschaulich entspricht dies dem Fall, dass eine über einen Spiegel betrachtete Linksschraube wie eine Rechtsschraube aussieht. Der gemessene Übertragungsfaktor beträgt jetzt nur -41.7 dB, siehe Bild 13, a). Mit einer weiteren Metallplatte, die in einem Winkel von 90° zum ersten Spiegel angeordnet ist, wird aus der RHCP-Welle wieder eine LHCP-Welle und die Empfangsantenne kann diese mit -27.7 dB empfangen (wie im Falle der direkten Sichtlinie in Bild 6). Das "Übersprechen" von links zirkular auf rechts zirkular beträgt also -14 dB (die Größe dieses Werts hängt davon ab, dass in dem einfachen Versuchsaufbau Mehrfachreflexionen nicht vollständig auszuschließen sind), das ist weniger als 1/25 der Strahlungsleistung gegenüber dem Fall in Bild 6 und b) in Bild 13.

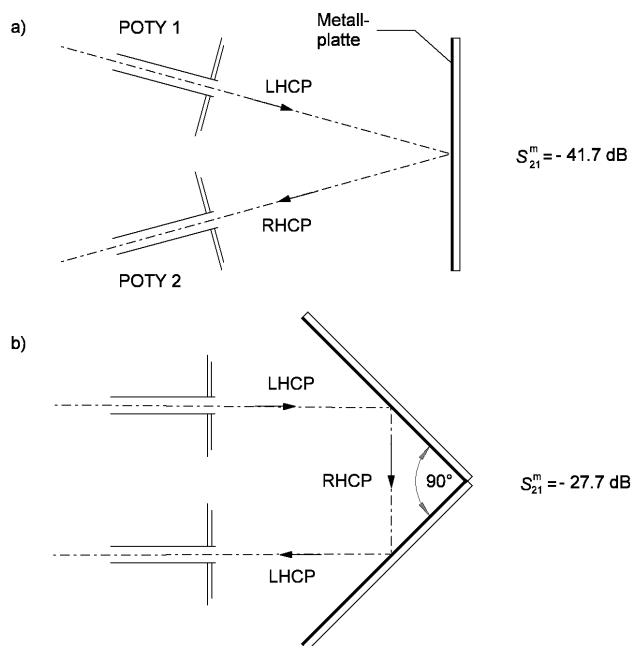


Bild 13: Experimente zur Reflexion der links zirkular polarisierten Strahlung (LHCP) an: a) einer Metallplatte, b) an zwei aufeinander senkrecht stehenden Metallplatten. S_{21}^m gemessener Vorwärtstransmissionsfaktor (Übertragungsstecke: Anschlussleitung, POTY 1, freier Strahlweg, POTY 2, Anschlussleitung). Der freie Strahlweg ist so groß gewählt wie in Bild 6. LHCP/RHCP left/right hand circular polarization

In Tabelle 3 sind die gemessenen Eigenschaften der POTY-Antenne zusammengefasst.

Tab. 3: Gemessene Eigenschaften der POTY-Antenne bei 2.40 GHz

Messgröße	Wert	Bemerkung, Bezug
Stehwellenverhältnis VSWR	1.20 ± 0.01	am Speisepunkt, Tab. 1
Gewinn G_{dB}	9.16 dBi	(8)
Richtfaktor D_{dB}	11.2 dBi	(9), (10)
Wirkungsgrad η	63 %	(12)
Fusspunktimpedanz	$(49.2 - j 8.8) \Omega$	
Strahlungswiderstand R_s	30.8 Ω	(13)
Öffnungswinkel $\Delta\varphi_{3dB}$	56°	Bild 10
Übersprechen LHCP-RHCP	-14 dB	Bild 13

Fazit

Bei hohen Frequenzen ist das Fernfeld von Antennen auch in geschlossenen Räumen messbar. Die Antenneneigenschaften von zwei identisch aufgebauten Patchantennen wurden bei 2.40 GHz in einem normalen Wohnraum umfassend messtechnisch bestimmt. Die POTY-Antenne hat einen Gewinn von ca. 9 dBi und zeigt eine Anpassung an eine Systemimpedanz von $50\ \Omega$ mit einem Stehwellenverhältnis von 1.20. Der gemessene Öffnungswinkel von 56° stimmt mit dem analytisch berechneten Öffnungswinkel einer in Analogie betrachteten Doppelspaltanordnung aus der Optik sehr gut überein. Der Spaltabstand entspricht der effektiven Breite des Patches, die durch die elektrischen Randfelder etwas größer ist, als die geometrische Breite. Durch Spiegelung der Emission der POTY-Antenne an einer Metallplatte wird aus der links zirkular polarisierten Strahlung eine rechts zirkulare Polarisation, die mit einer weiteren Spiegelung wieder in eine links zirkulare Polarisation übergeht. Das Übersprechen von links auf rechts zirkular wird mit 14 dB gedämpft.

22.8.2022, Reinhard Noll, DF1RN

Bezugsdokumente

- [1] Mike Willis, Remco den Besten, Paul Marsch, Es'hail-2 Oscar 100 Dual Band Patch Antenna, 21.2.2019, 10 p., https://uhf-satcom.com/blog/patch_antenna
- [2] POTY dual band feed antenna 2.4 GHz & 10 GHz for QO 100; <https://www.passion-radio.com/satellite-qo-100/poty-antenna-762.html>
- [3] Reinhard Noll, Messungen der Parameter von Koaxialkabeln mit Amateurmitteln, Funkamateure 9/18, 826-829
- [4] Huber+Suhner Data Sheet, Coaxial Cable RG 223/U; <https://www.koax24.de/shop/article/rg223u-koaxialkabel-d-540-mm-fep-temp-25c-bis-85c-050156.html>
- [5] Friis H., A note on a simple transmission formula, Proc. I.R.E. and Waves and Electrons, May 1946, 254-256
- [6] Zinke, Brunswig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Springer Verlag, 1965, S. 203
- [7] <https://dewiki.de/Lexikon/Antennengewinn#Antennenwirkungsgrad>
- [8] Rothammel. Antennenbuch, 12. Aufl., DARC Verlag, Baunatal, 2006, S. 77
- [9] Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik, 7. Aufl., Walter de Gruyter, 1978, S. 374
- [10] H. Wheeler, Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet, IEEE Tran. Microwave Theory Tech., MTT-13 (1965)172–185