

Feldstärkeberechnung für Modellflieger

Da die Hochfrequenz-Technik nicht immer ganz so einfach zu verstehen ist, will ich auf dieser Seite mal versuchen aufzuzeigen, welche Bedingungen ein armer RC-Empfänger so auf einem typischen Modellflugplatz vorfindet.

Da HF-Technik und auch Mathematik ziemlich langweilige Angelegenheiten sind, kann ich dem normalen Modellflieger aber nicht empfehlen hier überhaupt weiterzulesen!

Vielleicht muss ja aber mal ein armer Elektronik Student in einer Prüfung um 13Uhr die Frage beantworten:

„Wieso können Modellfernsteuerungen nicht 25km Distanz überbrücken? Die haben doch Senderleistungen von 100mW und die Empfängerempfindlichkeit ist auch meist besser 5µV.“

Wenn es mit dem Aufstehen vor 11Uhr noch geklappt hat, ist vielleicht noch ein bisschen Zeit schnell noch mal die Seite zu überfliegen, bevor wieder mal das Ozonloch her hatten muss.

Also schnell noch mal ins Tabellenbuch geschaut, ich glaube das hier war doch die Formel für die Feldstärke :

$$E_T = \sqrt{\frac{P_T * G_T * Z_0}{4 * \pi * r^2}}$$

E_T - Elektrische Feldstärke [V/m] = ???

P_T - Sendeleistung [W] = 0,1W

Z_0 - Wellenwiderstand Freiraum [V/A] = 377Ohm

r - Distanz [m] = 25000m

G_T = Antennenwirkungsgrad = 0,3

Yoohuu ich hab's.

Also schnell noch mal durchgerechnet.

Die Feldstärke in 25km Entfernung wird sicher für den Empfänger viel zu klein sein:

$$E_T = \sqrt{\frac{0,1 * 0,3 * 377}{4 * \pi * 25000^2}} = 37,9 \mu V / m$$

Wie komme ich jetzt von der Feldstärke auf die Empfängerempfindlichkeit?

Noch mal schnell ins Tabellenbuch geschaut:

$$U_{\lambda/2} = \frac{E_T * \lambda}{2 * \pi}$$

$U_{\lambda/2}$ – Antennenspannung am $\lambda/2$ Dipol [V]
 λ - Wellenlänge [m]

$$U_{\lambda/2} = \frac{37,9 * 8,57}{2 * \pi} = 51,8 \mu V$$

Wenn die RC-Empfänger anstelle eines Dipols eine $\lambda/4$ -Antenne benutzen, kommt natürlich weniger am Empfänger an. Außerdem wird wohl der Antennenwirkungsgrad von der Drahtantenne nicht so gut sein. Ich rechne also besser mal mit insgesamt 0,1.

$$U_{\lambda/4} = 52 * 0,1 = 5,2 \mu V$$

O je, was will der von mir, natürlich müssen Modellfernsteuerungen 25km überbrücken können, das ist doch wohl eindeutig an dem Beispiel zu sehen. Gut, dann schauen wir noch mal im Buch bei ‚Sonnenflecken‘ und ‚Ozonloch‘ nach. Ja genau, hier steht es ja eindeutig Sonnenflecken haben Einfluss auf die Empfangsbedingungen.

Der Professor hat also recht. 25km ist zuviel. Es sind auf jeden Fall weniger, zumindest bei Sonnenflecken. Jetzt sollte ich wohl langsam mal zu meiner Prüfung gehen.

Da fällt mir gerade ein, dass ein Freund von Reichweiteproblemen schon bei 300m Entfernung in Bodennähe berichtet hat. Dem sollte ich vielleicht doch noch schnell eine Mail schreiben. Der soll sich mal eine Markenanlage kaufen. Die kommen locker auf 25km, ohne Sonnenflecken versteht sich.

Aber was meinte der mit Bodennähe?

Als ob der Boden da einen Einfluss haben könnte. Davon ist in der Formel doch wohl nichts zu sehen.

Die Energie breitet sich nach der Formel gewissermaßen auf einer Kugeloberfläche aus, das ist doch wohl klar.

Ja klar, reflektieren wird die Erde schon ein bisschen und unter Umständen kann die reflektierte Welle die direkte Welle vielleicht auch mal ein bisschen auslöschen .

Darüber soll sogar mal in einer Vorlesung gesprochen worden sein. Die Vorlesung hat aber damals sehr sehr zeitig begonnen, so dass ich die wohl irgendwie verpasst haben muss.

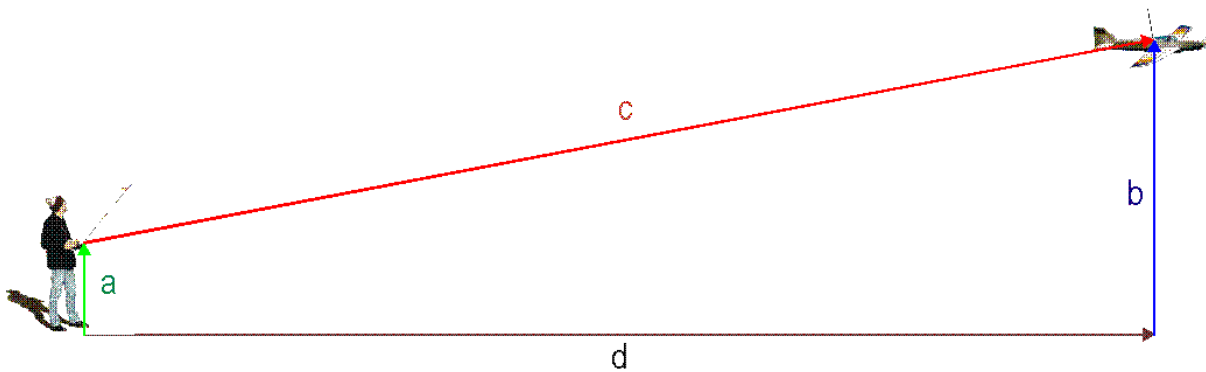
Es soll aber gesagt wurden sein, dass ein guter Reflektor das Signal fast 100%ig reflektieren kann.

Aber eine Reduzierung von 25km auf 300m das geht niemals.

Schließlich muss ja auch noch die Phasenlage stimmen um das Signal überhaupt etwas auslöschen zu können.

Da ich in Mathe immer ganz gut war, kann ich das ja mal schnell nachrechnen.

Da nehme ich doch gleich mal das Beispiel von 300m Entfernung.



So in etwa könnte es ausgesehen haben. Als Beispiel nehmen wir mal folgende Werte an:

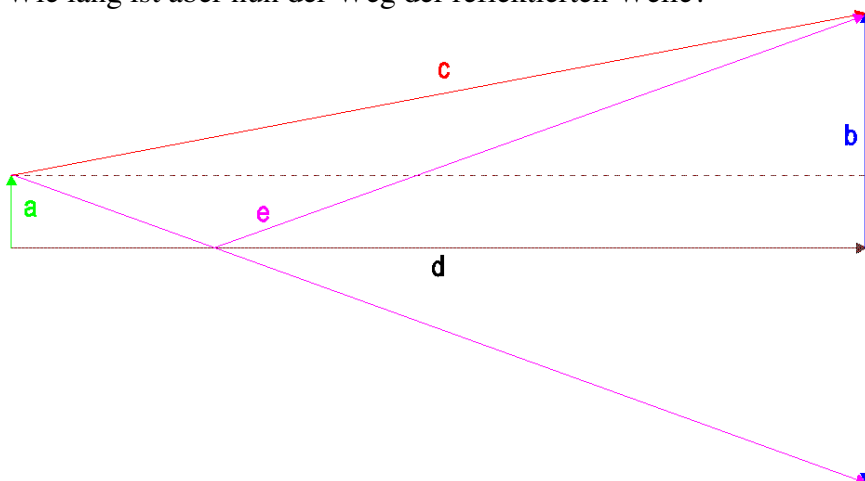
$$a = 1,5\text{m}$$

$$b = 5\text{m}$$

$$d = 300\text{m}$$

$$c = \sqrt{(b - a)^2 + d^2} = 300,02\text{m}$$

Die direkte Welle legt in dem Beispiel eine Entfernung von 300,02m zurück.
Wie lang ist aber nun der Weg der reflektierten Welle?



$$e = \sqrt{(b + a)^2 + d^2} = 300,07\text{m}$$

Die reflektierte Welle legt in dem Beispiel einen Weg von 300,07m zurück

Der Längenunterschied der beiden Wellen beträgt also 5cm.

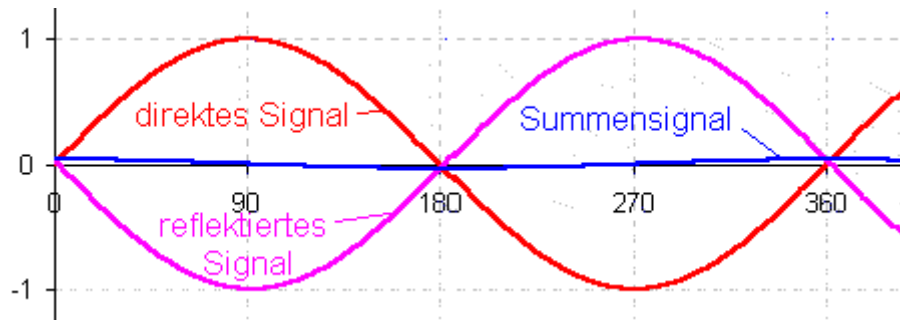
Wie groß ist nun dieser Unterschied bezüglich der Wellenlänge?

$$\Delta\varphi = 0,05\text{m} / 8,57\text{m} * 360^\circ = 2,1^\circ$$

Durch die Reflexion erhält die reflektierte Welle noch zusätzlich einen Phasensprung von 180° , macht zusammen also $182,1^\circ$.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi + 180^\circ = 182,1^\circ$$

Wie es aussieht, löscht die reflektierte Welle die direkte Welle doch in ziemlich hohen Maße aus.



In der Summe bleibt in dem Beispiel von der Feldstärke die normalerweise in einer Entfernung von 300m sein würde nur noch das 0,036fache übrig.

Die obigen Formeln noch mal für 300m Entfernung durchgerechnet müsste am Empfänger normalerweise folgende Antennenspannung ankommen:

$$U_{\lambda/4} = 430\mu V$$

Durch die Auslöschung der Wellen wird die Feldstärke nur noch das 0,036fache betragen.

$$U_{\lambda/4} = 430\mu V * 0,036 = 15,5\mu V$$

Das ist zwar mehr als 5µV aber bei ungünstigen Antennenpositionen kann ich mir vorstellen, dass es da bereits schon mal zu Aussetzern kommen kann.

Würde es keine Reflexionen geben, so würde diese Antennenspannung noch in etwa 7,5km Entfernung am Empfänger anliegen.

Der Effekt ist also doch nicht zu vernachlässigen.

Rechnen wir das ganze noch mal für 600m Entfernung durch so erhalten wir folgendes Ergebnis:

Der Wegunterschied beträgt aufgrund des nun stumpferen Winkels nur noch 2,5cm. Daraus ergibt sich ein Phasenunterschied von:

$$\Delta\varphi = 181,05^\circ$$

Die Auslöschung bei 600m wird also stärker sein als bei 300m. Genaugenommen wird jetzt nur noch das 0,018fache übrigbleiben.

$$U_{\lambda/4} = 215\mu V * 0,018 = 3,9\mu V$$

Bei 600m werden also bereits unter günstigen Bedingungen die meisten Empfänger aussteigen.

Wer möchte kann jetzt auch noch andere Variationen durchrechnen.

Was passiert wenn der Empfänger in nur 2,5m Höhe fliegt? Was wenn der Sender 1m höher steht? usw.

Die Physik und auch Mathematik ist dabei immer die gleiche.

Natürlich gelten die Beispiele nur, wenn das Signal exakt 100%ig vom Boden reflektiert wird.

Wenn man diesen als ungünstigsten Fall annimmt, kommt man zu folgenden Verallgemeinerungen:

Ein erhöhter Sendestandpunkt wirkt sich ebenso positiv wie ein höher fliegendes Modell auf die Phasenverschiebung und somit auch auf die Empfangsbedingungen aus.

Um die Reichweite in gleicher Höhe zu **verdoppeln** muss entweder:
die Sendeleistung **versechzehnfacht** oder
die Empfängerempfindlichkeit **vervierfacht** werden.

Zur Erinnerung:

Ohne Reflexionen würde man das Gleiche bereits durch die Vervielfachung der Sendeleistung bzw. Verdopplung der Empfängerempfindlichkeit erreichen.

Glücklicherweise kann der Boden die Welle nicht wirklich exakt 100%ig reflektieren. Wenn er bereits 2% absorbiert, dann sieht die Rechnung bereits etwas besser aus, obwohl auch hier eine noch sehr starke Auslöschung erfolgt.

Der Vollständigkeit halber noch eine Beispielrechnung:

Nehmen wir das Beispiel mit den 600m, dann erhalten wir folgendes:

Die Phasenverschiebung bleibt unverändert bei $181,05^\circ$. Aber die Amplitude der reflektierten Welle ist nur 98% so groß wie die Amplitude der direkten Welle.

Daraus ergibt sich eine Auslöschung, wobei noch das 0,027fache der normalen üblichen Antennenspannung übrigbleibt.

Wir hätten also bei 600m Entfernung doch noch $5,8\mu\text{V}$ am Empfängereingang anliegen.

Das Beispiel zeigt auch welchen Einfluss die Bodenbeschaffenheit (Bodenleitfähigkeit) auf die Feldstärkeverteilung haben kann.

Ist der Boden im Flugbereich gleichmäßig gut reflektierend, so wird die Feldstärke sich nach den oben genannten Gesetzen unter Berücksichtigung der Reflexionen Räumlich verteilen.

Unterschiedliche Bodenfeuchtigkeiten z.B. werden aber dazu führen, dass nicht immer exakt die gleichen Bedingungen herrschen werden.

Es kann also schon passieren, dass an einem Tag die Empfangsbedingungen besser und an einem anderen Tag schlechter sind.

In der Praxis wird es im Flugbereich bestimmte Stellen im Boden geben, welche besser reflektieren als andere Stellen, sei es, weil sich unterirdisch verschiedene Bodenschichten befinden oder auch vielleicht nur eine Wasserleitung verlegt ist.

Das hat dann zur Folge dass die Feldstärke sich nicht mehr so gleichmäßig verteilt, wie oben beschrieben.

Es können Zonen auftreten, in denen die Empfangsbedingungen schlechter sind als in benachbarten Bereichen.

Im freiem Felde sollte aber der schlimmste Fall die 100%ige Reflexion sein. Mehr Auslöschung als mit den Formeln oben berechnet ist nicht möglich.

Befinden sich auf dem Flugfeld aber auch noch Gebäude oder andere Dinge die in der Lage sind die 35MHz-Welle zu reflektieren, so wird die Sachen nach etwas komplexer.

Hier sind dann theoretisch sogar Totalauslöschungen des Signals auch in kurzen Distanzen möglich.

Diese werden auf Grund der Physik dann aber Räumlich auf kleinstem Raum beschränkt sein. Ein wenig daneben kann es dann auch mal Signalverstärkungen geben.

Test:

Fall es jemand doch geschafft hat bis hier her zu lesen dann noch ein praktischer Test:

Stellt den Sender auf einen Tisch, Auto oder was immer, so dass die Antenne senkrecht steht. Dann geht mit einem einfachen PPM-Empfänger und einem angeschlossenen Servo so weit, bis das Servo leicht anfängt zu brummen.

Die Empfängerantenne sollte dabei ebenfalls als Stabantenne verlegt sein (z.B. an einen Holzstab anbinden oder gleich mit dem ganzen Modell gehen)

Jetzt probiert mal die Empfangsantenne senkrecht nach oben zu halten und danach diese langsam nach unten zu schwenken bis sie letztlich genau in Richtung des Senders zeigt.

Jetzt versucht mal die Stelle (Winkel) herauszufinden, wo das Brummen am Stärksten ist.



Wer jetzt glaubt, das stärkste Brummen wird auftreten, wenn die Empfängerantenne genau in Richtung des Sender zeigt, dem empfehle ich diesen Versuch mal in der Realität wirklich zu machen.

Aber Achtung, 200-300m wird man da vielleicht mal laufen müssen.

Ist doch gut, dass es die Reflexionen gibt, oder? Sonst müsste man das ganze ja in 25km Entfernung machen.

Also dann, viel Spaß beim Testen

Gruß Dietrich