

Funkbetrieb über Satelliten

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	3
2. Satellitenbahnen.....	3
2.1 Geostationäre Satelliten.....	3
2.2 Geosynchrone Satelliten	4
2.3 Satelliten mit niedriger Flughöhe.....	5
3. Die verschiedenen Kategorien von Afu-Satelliten.....	6
3.1 Satelliten für reinen Digitalbetrieb.....	6
3.2 FM-Satelliten.....	6
3.3 Lineartransponder.....	6
4. Die Bodenstation.....	6
4.1 Die Antennenanlage.....	7
4.2 Das Funkgerät.....	7
4.3 Die Antennennachführung.....	8
4.4 Die Antennensteuerung.....	8
4.4.1 Die Bahnberechnung.....	8
4.4.2 Die Rotorsteuerung.....	10
5. Der Funkbetrieb.....	11
5.1 Betrieb über einen FM-Satellit.....	11
5.2 Betrieb über einen Lineartransponder.....	12
6. Zusammenfassung.....	13
7. Anhang.....	13
7.1 Der geostationäre Satellit.....	13
7.2 Der geosynchrone Satellit.....	14
7.3 Satellit mit niedriger Umlaufbahn.....	14
8. Quellenverzeichnis.....	15

1. Vorwort

Zu Zeiten der stetig schlechter werdender Ausbreitungsbedingungen auf den höheren Bändern und des stetig ansteigenden QRM-Pegels auf den unteren Bändern bedingt durch den Elektroschrott in der näheren und fernerer Nachbarschaft bleibt nur die Möglichkeit auf Betriebsarten umzusteigen, die gegen QRM robuster sind oder mit Funkbetrieb über Satelliten die Flucht nach oben anzutreten. Was man für einen solchen Betrieb an an Gerätschaften braucht und wie der Betrieb selbst abläuft soll in diesem Vortrag gezeigt werden.

2. Satellitenbahnen

Für unsere Betrachtung lassen sich die möglichen Satellitenbahnen in drei Klassen einteilen:

- Geostationäre Satelliten,
- Geosynchrone Satelliten und
- Satelliten mit niedriger Flughöhe.

2.1 Geostationäre Satelliten

Geostationäre Satelliten sind solche, die von der Erde aus betrachtet zu jeder Zeit unter demselben Winkel (Höhe und Richtung) am Himmel zu stehen scheinen. Das wird dadurch erreicht dass man den Satelliten in eine kreisförmige Umlaufbahn (Kreisradius 42160km) über dem Äquator schickt. In dieser Höhe ist die Umlaufzeit des Satelliten genauso groß wie die einer Erdumdrehung (23h, 56 min, 4,08s).

Die Vorteile dieser Satelliten:

- Man braucht die Sende- oder Empfangsantennen nur einmal auf den Satelliten ausrichten.
- Es gibt keinen Doppler-Effekt, also keine Verschiebung der Frequenzen zwischen Sender und Empfänger

Natürlich gibt es auch einige Nachteile:

- Die Entfernung zum Satelliten ist immer größer als 36000km. Es braucht also höhere Sendeleistungen
- Der Satellit ist nur von einem (immer festen) Teil der Erdoberfläche aus sichtbar.
- Die geostationäre Umlaufbahn ist keine stabile Umlaufbahn, die Bahn des Satelliten muss in bestimmten Zeitabständen korrigiert werden. Geht der Treibstoff für die Bahnkorrekturen zu Ende, kann der Satellit auch nicht mehr geostationär genutzt werden.
- Der Energieaufwand um einen Satelliten auf eine so hohe Umlaufbahn zu schicken ist gewaltig (etwa 16kWh pro kg). Dieser Wert mag recht klein erscheinen, das ist aber nur der Energieaufwand für die Nutzlast selbst. Die vielen Tonnen der dafür erforderlichen Trägerrakete und der Treibstoff sind hier nicht mit eingerechnet. (Herleitung siehe Anhang).

Wir kennen diese Art der Satelliten aus dem SAT-Fernsehen. Speziell wegen der letzten beiden Punkte gibt es für den Amateurfunk noch keinen geostationären Satelliten. Für den Herbst 2017 ist

aber der Start eines Fernseh-Satelliten geplant der zusätzlich zu den Fernsehtranspondern eine Amateurfunklast hat.

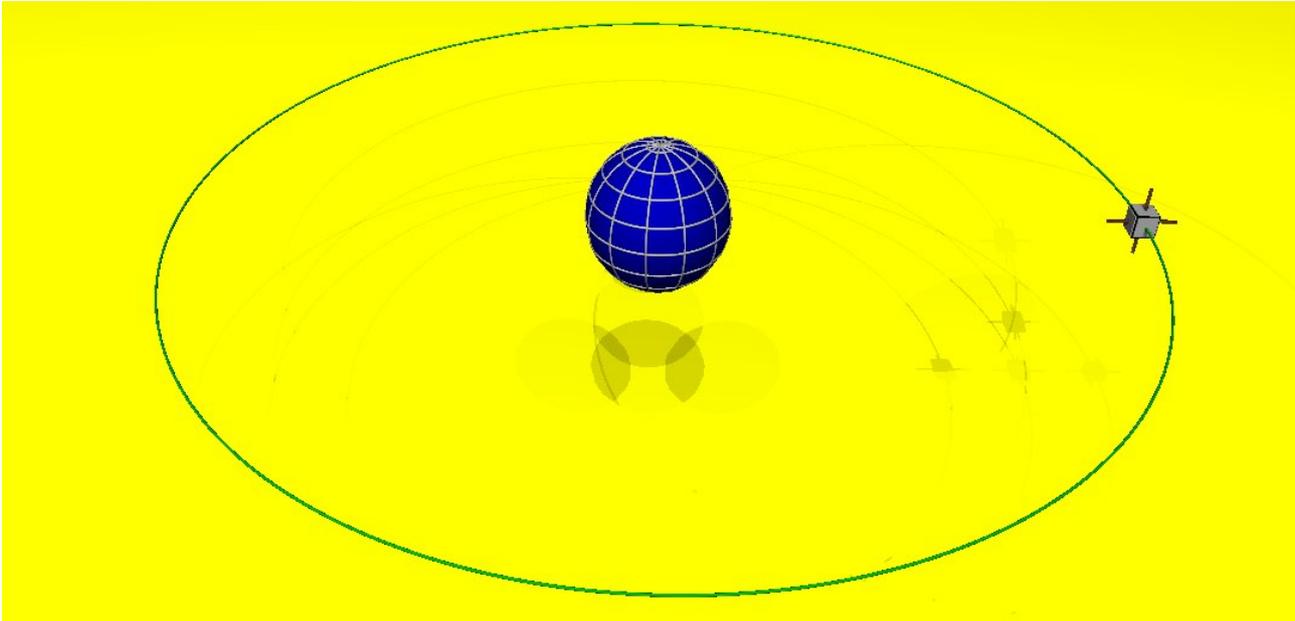


Bild1: Maßstäbliche Darstellung der geostationären Satellitenbahn

2.2 Geosynchrone Satelliten

Geosynchrone Satelliten haben – ebenso wie die geostationären – eine Umlaufzeit die genau der Zeit einer Erdumdrehung entspricht. Deren Bahn ist aber nicht kreisförmig sondern stark elliptisch. Außerdem können deren Bahnen gegenüber der Äquatorebene gekippt werden (die Inklination ist ungleich 0 Grad). Das führt dazu, dass sich diese Satelliten von der Erde aus gesehen zwar bewegen, zur selben Uhrzeit aber immer an derselben Stelle am Himmel stehen. In der Nähe des Apogäums (also des erdfernsten Punktes) bewegen sich diese Satelliten sehr langsam, während sie sich am Perigäum am schnellsten bewegen.

Vorteile dieser Satelliten:

- in der Nähe des Apogäums verhalten sich diese Satelliten fast wie geostationäre. Man braucht die Antennen über längere Zeit nicht nachstellen.
- Der Dopplereffekt ist in Apogäumsnähe ebenfalls verhältnismäßig gering.
- Der Satellit deckt eine deutlich größere Fläche der Erde ab als der geostationäre (außerhalb des Apogäums allerdings mit höheren Relativgeschwindigkeiten und damit auch größeren Doppler-Verschiebungen).
- Im Gegensatz zu den geostationären, lassen sich mit diesen Bahnen auch polare Regionen ausleuchten.

Nachteil:

- Der Energieaufwand (17kWh/kg) ist mit dem eines geostationären Satelliten vergleichbar hoch.

Derzeit gibt es zwar noch keine geosynchronen Satelliten mit Amateurfunklasten, in näherer

Zukunft ist aber ein solchen Satellit geplant.

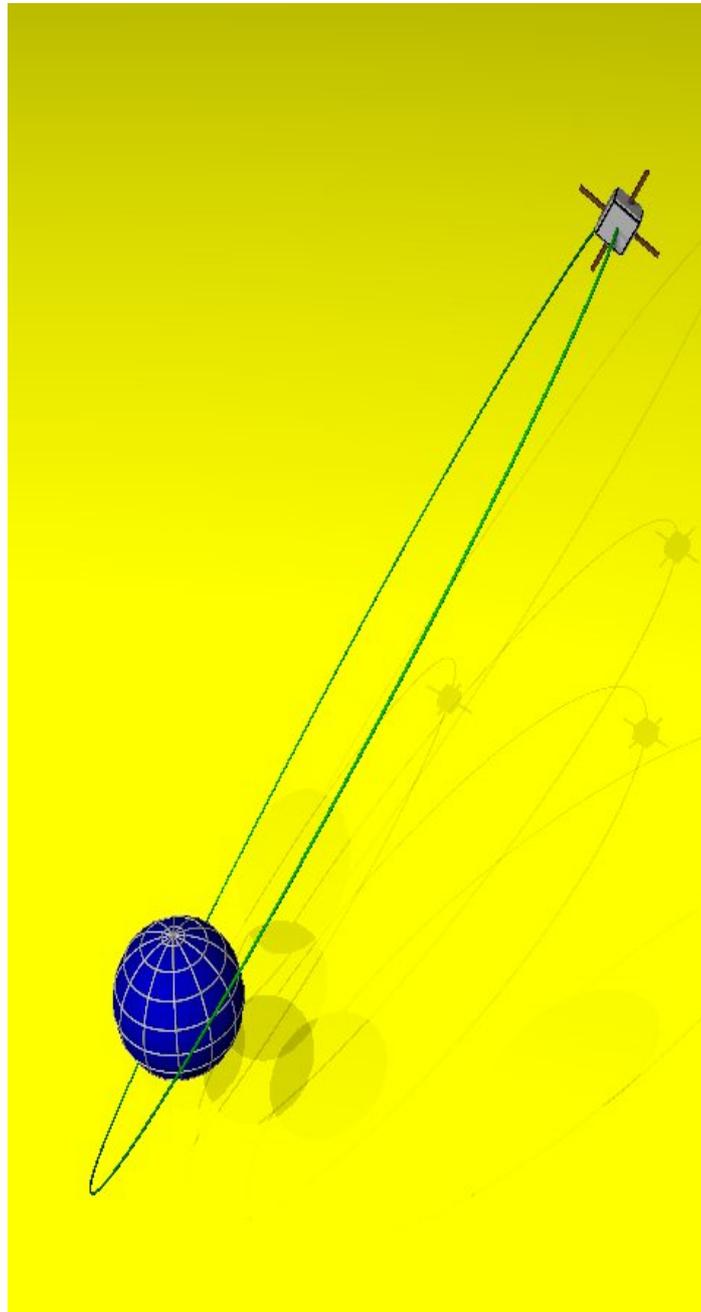


Bild2: Maßstäbliche Darstellung einer geosynchronen Satellitenbahn

2.3 Satelliten mit niedriger Flughöhe

Bei den meisten Satelliten liegt die Flughöhe zwischen 400km und 2000km. Sie werden für Aufgaben wie z.B. Erdkundung eingesetzt. Deshalb sind deren Bahnen kreisförmig und so tief wie möglich. Zum Einen um Energie zu sparen, zum Anderen um gerade weit genug von der Atmosphäre weg zu sein dass sie in ihrer Lebenszeit nicht bis zum Absturz ausgebremst werden.

Funkbetrieb über Satelliten

Amateurfunksatelliten werden bei den dafür nötigen Raketenstarts meist als Zusatzlast mit auf die Bahn gebracht und haben deshalb ähnliche Flugbahnen wie die primäre Raketenlast. Diese Bahnen haben neben einer Reihe von Nachteilen auch einen Vorteil:

- Wegen der niedrigen Höhe sind auch die Entfernungen zum Satelliten gering. Für den Funkbetrieb reichen deshalb auch kleinere Leistungen aus. Das gilt natürlich nicht nur für die Bodenstation sondern auch für den Satelliten selbst.
- Der Energieaufwand um einen Satelliten in eine 600km-Umlaufbahn zu schicken ist mit etwa 9.4kWh pro kg merklich geringer als der Aufwand für einen geostationären Orbit. (Herleitung und Berechnung des Wertes siehe Anhang).

Die Nachteile sind:

- Die Satelliten bewegen sich sehr schnell (von Horizont zu Horizont in ca. 10 bis 20 Minuten)
- Sie zeigen starke Dopplerverschiebungen.
- Sie sind nur wenige Minuten pro Tag sichtbar.
- Sie decken – wenn sich in den Sichtbarkeitsbereich kommen - nur eine verhältnismäßig kleine Fläche ab.

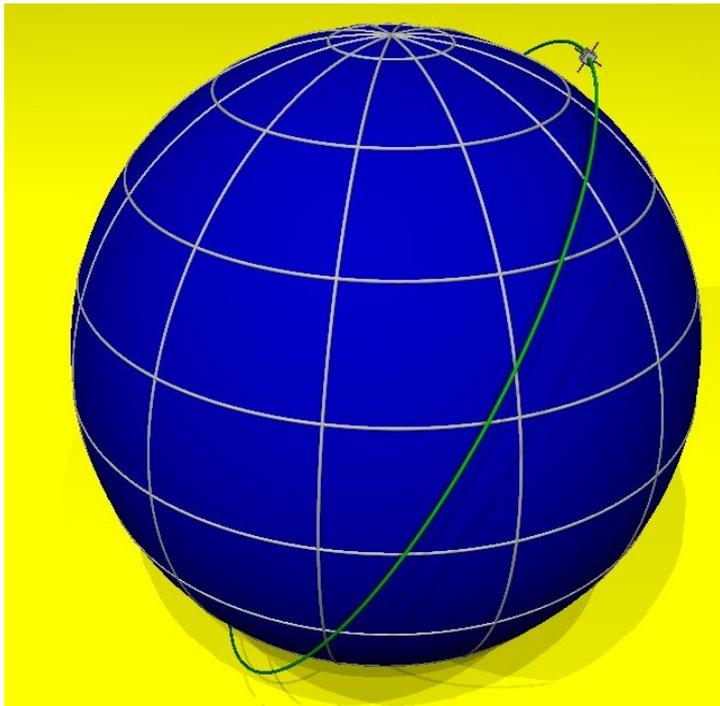


Bild3: Maßstäbliche Darstellung einer Satellitenbahn niedriger Höhe (600km)

3. Die verschiedenen Kategorien von Afu-Satelliten

Um Satellitenstarts bezahlbar zu halten werden die Afu-Satelliten öfter auch als Träger wissenschaftlicher Experimente konzipiert. Sie sind deshalb nicht von Anfang an für den Amateurfunk nutzbar und in dieser Zeit nur durch ihre Funkbake auszumachen. Sind sie dann für den Amateurfunk freigeschaltet lassen sie sich in folgende Kategorien einteilen:

- Satelliten für reinen Digitalbetrieb,
- FM-Satelliten,
- Lineartransponder.

3.1 Satelliten für reinen Digitalbetrieb

Diese Satelliten sind für bestimmte digitale Übertragungsverfahren ausgelegt. Um darüber Betrieb machen zu können ist eine Software zur Kodierung und Dekodierung nötig. Außerdem ist die für den Funkbetrieb nötige Bandbreite meist höher als die „normaler“ Funkgeräte. Aus diesen Gründen habe ich mich mit dieser Art von Satelliten bisher nicht weiter beschäftigt.

3.2 FM-Satelliten

FM-Satelliten sind im Prinzip so gebaut wie die terrestrischen FM-Relais. Sie haben eine Empfangs- und eine Sendefrequenz. Für das Ansprechen ist meist ein CTCSS-Ton erforderlich. Der Unterschied zu den terrestrischen Relais: Sender und Empfänger liegen in unterschiedlichen Bändern (z.B. 2m-Band / 70cm-Band). Zusätzlich habe diese Satelliten (wie die anderen auch) eine Funkbake die in CW oder einer anderen digitalen Betriebsart die Kennung des Satelliten und dessen Telemetriedaten sendet.

3.3 Lineartransponder

Der Lineartransponder setzt ein bestimmtes Frequenzband in ein anderes um. Letztendlich handelt es sich dabei um einen breitbandigen Empfänger (Bandbreite je nach Satellit zwischen 20kHz und 100kHz), einem Mischer und einem Sender der das hoch- oder heruntergemischte Band wieder ausstrahlt. Um die Auswirkungen des Dopplereffektes möglichst klein zu halten wird das Frequenzband „gespiegelt“ d.h. aus der höchsten Empfangsfrequenz wird die tiefste Sendefrequenz und umgekehrt. Auch diese Satelliten haben parallel zum Transponder eine Bake die meist in CW die Satellitenkennung und die Telemetriedaten sendet.

4. Die Bodenstation

Um über niedrig fliegende Satelliten Funkbetrieb machen zu können muss die Funkanlage Funktionen erfüllen die hier beschrieben werden sollen. Natürlich sind Sende- und Empfangsversuche auch ohne die unten beschriebenen Funktionen möglich, die Gefahr ist aber groß dass diese Versuche mit sehr frustrierenden Ergebnissen (vorwiegend für die anderen Satellitenteilnehmer) enden.

4.1 Die Antennenanlage

Die mit Abstand meisten Satelliten benutzen das 2m-Band sowie das 70cm-Band. Höhere Bänder fallen für tief fliegende Satelliten aus weil dort die Dopplerverschiebung einfach zu groß wird. Wegen der verhältnismäßig kleinen Entfernungen reichen Antennen mit kleinerem Gewinn aus. Bei zu hohem Gewinn besteht außerdem die Gefahr dass der betroffenen Satellit bei Positionierungsfehlern der Antenne aus der Sende/Empfangskeule wandert. Eine 6-Element Yagi und eine Helixantenne mit 12 Windungen hat sich bei meinen Versuchen mit 25W Sendeleitung als guter Kompromiss erwiesen. Zirkular polarisierte Antennen haben gegenüber den linearen den

Funkbetrieb über Satelliten

Vorteil dass sie kein durch die Polarisation bedingtes Fading erzeugen. Dieser Vorteil wird allerdings durch einen Verlust des Gewinns von -3dB erkauft. Das folgende Bild zeigt das beschriebene Beispiel der Yagi/Helix-Kombination.



Bild 4: Antennenkombination für Satellitenfunkbetrieb

4.2 Das Funkgerät

Für den Funkbetrieb über Satelliten ist es notwendig die Reaktion des Satelliten auf die eigene Aussendung immer mit abzuhören. Sender und Empfänger müssen also gleichzeitig laufen. Aus diesem Grund verwenden die Afu-Satelliten für Sendung und Empfang immer unterschiedliche Bänder. Das mithören ist notwendig um während der eigenen Sendung mitzubekommen ob man selbst noch stark genug beim Satelliten ankommt, ob man bedingt durch den Dopplereffekt in ein anderes QSO „hineinrutscht“ ob die eigene Aussendung durch QRM gestört ist und ob die eigene Dopplerkorrektur (siehe Punkt Funkbetrieb) richtig ist. Sehr hilfreich ist es, wenn man Sende- und Empfangsfrequenz gleichlaufend oder gespiegelt koppeln kann. Mit dieser Funktion kann man schnell Frequenzwechsel machen ohne sich in seine Sende-QRG jedes mal neu „einpfeifen“ zu müssen. Eine Sendeleistung von 25W ist im allgemeinen ausreichend.

4.3 Die Antennennachführung

Für ein gutes QSO ist es wichtig, dass die Antennen zu jedem Zeitpunkt auf den Satelliten zeigen. Dafür braucht es eine Rotoranlage mit einem Azimutrotor (also für die Himmelsrichtung) und einen Elevationsrotor (für die Höhe). Der Elevationsrotor sollte von 0 Grad bis 180 Grad gehen - also

über die Senkrechte (90°) hinaus wieder in die Waagerechte wobei die Antennen bei 180° dann „auf dem Kopf“ stehen. Diese Funktion ist sehr hilfreich wenn man Satelliten verfolgen möchte die im Süden vorbeiziehen. Hat der Azimutrotor nämlich nur einen Winkel von knapp über 360° (was meistens der Fall ist) und lässt sich von Süden über Norden wieder nach Süden drehen, dann gibt es bei im Süden vorbeifliegenden Satelliten das Problem dass der Rotor genau im Süden stoppen muss und um 360° drehen muss um dann die Verfolgung der zweiten Bahnhälfte zu starten. Damit fällt die Verbindung zum Satelliten für einige Zeit aus. Um das zu vermeiden kann man die Antenne „auf den Kopf“ stellen und den Azimutrotor sozusagen im Inversbetrieb über Norden laufen lassen während die Antennen den Süden überstreichen.

4.4 Die Antennensteuerung

Für eine effektive Antennensteuerung sind zwei Komponenten erforderlich:

- Eine Bahnberechnung die zu jedem Zeitpunkt die Azimut- und Elevationswinkel des gewünschten Satelliten berechnet
- Eine Steuerung, die diese Winkelangaben in die Steuersignale für die Rotoren umsetzt.

4.4.1 Die Bahnberechnung

Programme zur Bahnberechnung gibt es inzwischen viele. Nachdem ich aber zu Beginn meiner Satellitenversuche keine brauchbare Software gefunden habe, die auf UNIX-Systemen läuft und die passenden Schnittstellen für meine Steuerung liefert, habe ich die Bahnverfolgungssoftware selbst geschrieben. Zusätzlich zu reinen Vorgabe der Winkel für die Antennensteuerung wurde noch eine graphische Ausgabe der aktuellen Winkel, der Dopplerverschiebungen, der damit korrigierten Sende- und Empfangsfrequenzen und von Vorhersagen implementiert.

Funkbetrieb über Satelliten

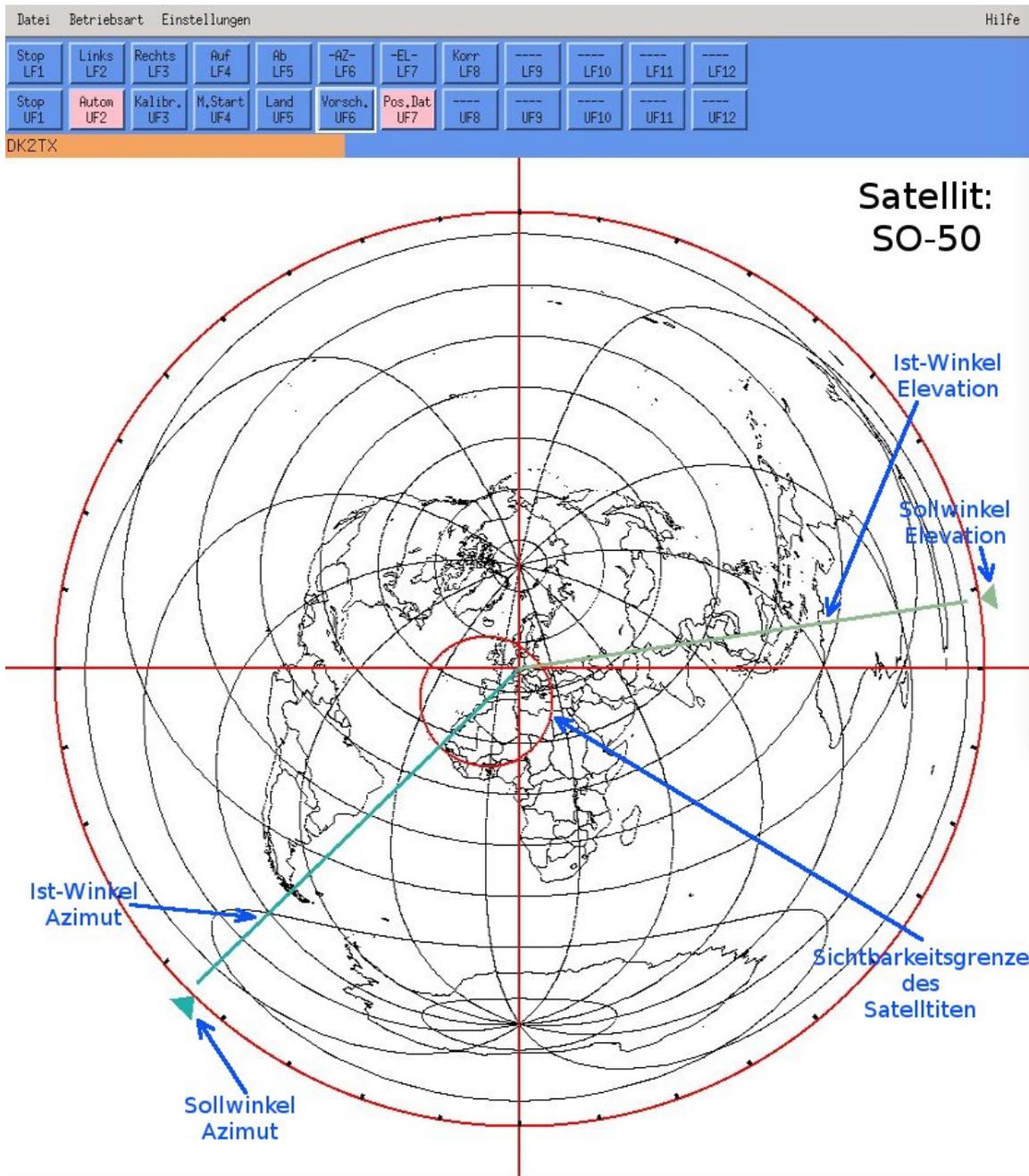


Bild 5: Darstellung des Sichtbarkeitsbereiches eines Satelliten und Stellung der Antennen

Funkbetrieb über Satelliten

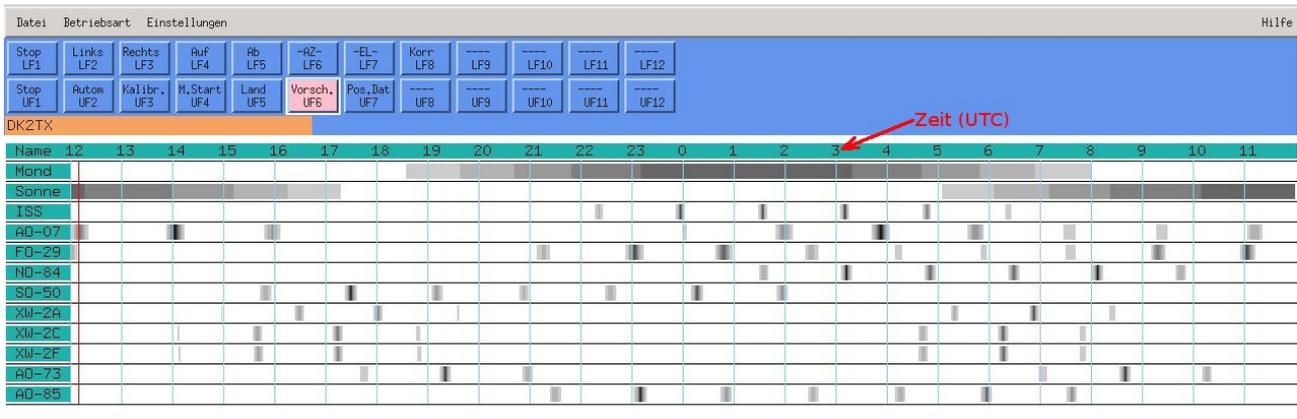


Bild 6: Vorschau bild mit den Überflugszeiten und Elevationswinkeln der aktuellen Satelliten

Bei der Bahnberechnung geht man von standardisierten Datensätzen aus den „Keplerdaten“. Diese Keplerdaten werden von der NASA aufgrund von Radarmessungen für die einzelnen Satelliten erstellt. Nachdem die Satelliten, abhängig von ihrer Flughöhe ihre Bahnen nicht vorhersagbar ändern, werden diese Keplerdaten im Abstand weniger Tage aktualisiert. Um zu korrekten Ergebnissen zu kommen sollte bei der Bahnberechnung jeweils der neueste Datensatz verwendet werden.

FO-29

```
1 24278U 96046B 16314.69505623 -.00000044 00000-0 -86259-5 0 9994
2 24278 98.5827 220.8565 0350282 185.6978 174.0128 13.53071608999190
```

Bild 7: Beispiel für einen Kepler-Datensatz

4.4.2 Die Rotorsteuerung

Nachdem schon die Bahnberechnung Eigenbau war, wurde auch die Rotorsteuerung im Eigenbau erstellt. Das zentrale Teil dieser Steuerung ist ein Atmel Prozessor der über eine serielle Schnittstelle von einem PC die Soll-Winkel mitgeteilt bekommt. Aufgrund der aktuellen Winkelrückmeldung von den Rotoren entscheidet der Prozessor dann welcher Rotor in welcher Richtung bewegt werden soll.



Bild 8: Rotorsteuerung

5. Der Funkbetrieb

Abhängig davon ob man über einen FM-Satellit oder einen Lineartransponder Funkbetrieb machen möchte unterscheidet sich die Vorgehensweise etwas.

5.1 Betrieb über einen FM-Satellit

Bevor man mit dem Senden beginnt sollt man sich die Bake des Satelliten anhören. Aufgrund von deren Lautstärke lässt sich gut abschätzen die stark das Signal des Kommunikationskanals sein wird. Auch sollte man nicht vergessen den korrekten CTCSS-Ton einzustellen. Die Sendefrequenz sollte um die Dopplerverschiebung korrigiert werden. Wie groß die sendeseitige Dopplerverschiebung ist sollte entweder durch das Bahnverfolgungsprogramm angezeigt werden oder man ermittelt sie aus der Dopplerverschiebung auf der Empfangsseite. Dazu stellt man die Empfangsfrequenz so ein dass die Diskriminatorspannung „0“ ist. Je nach Band ist der sendeseitige Dopplershift dann das dreifache oder ein Drittel der Dopplerverschiebung auf der Empfangsseite. Während man im 2m-Band mit Verschiebungen von +3kHz rechnen muss sind es im 70cm-Band etwa +-10kHz.

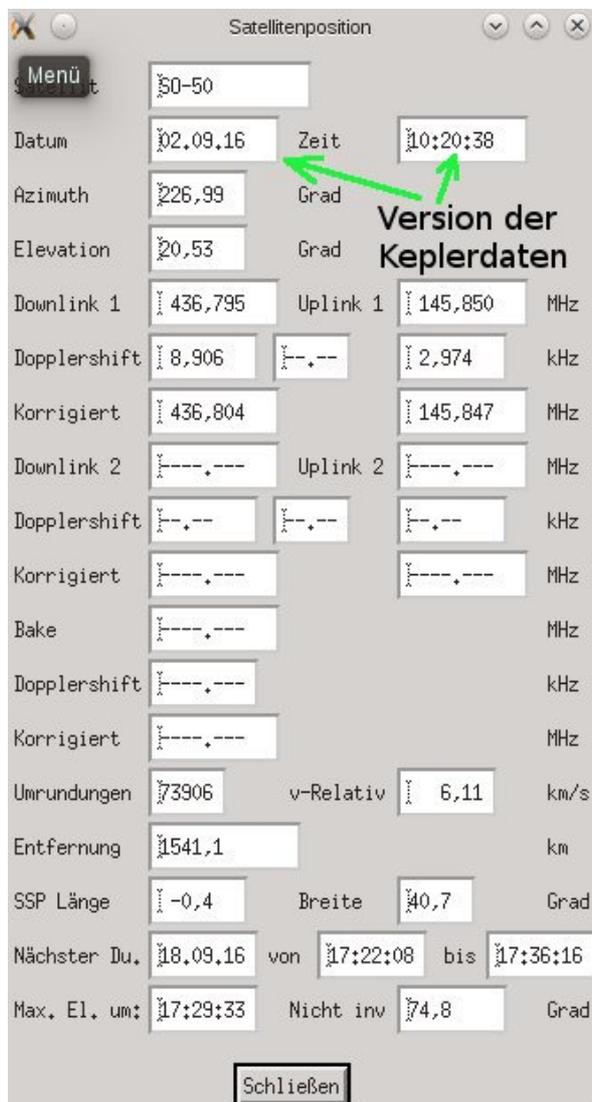


Bild 9: Berechnung der Dopplerverschiebungen

Funkbetrieb über Satelliten

Beim FM-Satelliten muss man sich darüber klar sein, dass es dort nur einen „FM-Kanal“ gibt also immer nur ein QSO laufen kann. Man sollte sich deshalb beim QSO ganz besonders kurz fassen um auch anderen OMs die Möglichkeit zu geben den Satelliten zu benutzen. Leider hat FM die Eigenschaft, dass – wenn mehrere gleichzeitig senden – nur der stärkste zu hören ist. Es gibt nun eine ganze Reihe von Stationen die diesen Effekt ausnutzen und mit hoher Leistung alle anderen QSOs niederbügeln und den Satelliten auf diese Weise ganz für sich vereinnahmen.

Vor diesem Hintergrund ist für mich die Aussage unverständlich, dass es bei den FM-Satelliten nicht notwendig sei, seine eigene Aussendung über den Satelliten mitzuhören.

5.2 Betrieb über einen Lineartransponder

Auch beim Lineartransponder ist es günstig sich zuerst die Funkbake anzuhören um einen Eindruck dafür zu gewinnen wie stark der Satellit ankommt.

Beim Funkbetrieb über einen Lineartransponder besteht die Gefahr, dass man wegen des Dopplereffektes in das Nachbar-QSO hineinrutscht. Die beste Methode das zu vermeiden wäre, die Sendefrequenz so zu verändern, dass der Frequenzabstand zwischen der Bake und dem eigenen vom Satelliten ausgesendeten Signal konstant bleibt. Das ist mit Amateurmitteln aber kaum machbar. Aus diesem Grund wendet man ein Kompromissverfahren an:

Man verändert nur die **höhere** der beiden Frequenzen so, dass die **tiefere** konstant zu bleiben scheint. Hier zwei Beispiele:

Der Satellit FO29 wird im Modus „J“ betrieben was bedeutet, dass er im 2m-Band empfängt (Uplink) und im 70cm-Band sendet (Downlink). Hört man nun eine Station mit der man ein QSO fahren möchte, stellt man die Sendefrequenz so ein, dass man sich selbst auf der Frequenz hört auf der auch die andere Station ruft. Ab dem Zeitpunkt lässt man die eigene Sendefrequenz konstant und stellt nur den Empfänger so nach dass man die eigene Aussendung gut hört. Beim Wechsel vom Empfang zum senden macht die Gegenstation dann das gleiche: Sie stellt den Sender so ein, dass sie sich auf der letzten empfangenen Frequenz so hört wie die Gegenstation und stellt während des Durchgangs nur noch die eigene Empfangsfrequenz nach.

Bei dem Satellit XW-2A ist es umgekehrt. Er wird im Modus „B“ betrieben was heißt, dass er im 70cm-Band empfängt und im 2m-Band sendet. Hier ist es so, dass man – nachdem man sich auf eine bestimmte Frequenz „eingepiffen“ hat – die eigene Sendefrequenz nachstellt, und die Empfangsfrequenz unverändert lässt.

Auch bei der eigenen Sendeleistung gibt es einen wichtigen Punkt. Wie der Name „Lineartransponder“ schon sagt, wird das empfangene Frequenzband – sieht man mal von der Spiegelung ab – in seiner gesamten Breite 1:1 verstärkt und wieder abgestrahlt. Werden die vom Satelliten empfangenen Signale zu stark, kann der Sender das verstärkte Frequenzband wegen der eigenen beschränkten Sendeleistung aber nicht mehr übertragen. Um trotzdem noch linear zu bleiben regelt der Satellit die Verstärkung über das gesamte Band zurück. Das führt dann dazu, dass die stärkste Bodenstation die Sendeleistung des Satelliten auf sich vereint und die anderen Stationen leiser werden oder überhaupt nicht mehr zu hören sind. Deshalb sollte im Satellitenbetrieb der Sprachprozessor immer ausgeschaltet sein und die Sendeleistung so weit reduziert werden dass man sich selbst in der Satellitenausstrahlung gerade noch gut hören kann.

Ganz schlimm können die Störungen anderer werden wenn OMs meinen auch ohne nachführbare Richtantennen auskommen zu können. Mit dieser Art der Antennen ist der betroffene Satellit deutlich leiser zu hören als mit einer korrekt ausgerichteten Antenne. Um sich selbst hören zu

können wird dann die eigene Leistung so weit aufgedreht bis das eigene Signal gut zu hören ist. Das ist dann um den Signalabstand zwischen korrekt und falsch eingerichteter Antenne zu hoch.

6. Zusammenfassung

Wie aus der Beschreibung zu erkennen ist, ist der Aufwand für den Funkbetrieb über Satelliten nicht unerheblich. Mit den zur Zeit verfügbaren Satelliten sind wegen der geringen Flughöhe keine wirklichen DX-QSOs möglich. Auch die QSOs selbst haben meist eher Contest-Charakter denn ausgiebige Plaudereien sind in den kurzen Sichtbarkeitsfenstern der einzelnen Satelliten nicht möglich. Trotzdem ist es für mich in Zeiten geringer Sonnenaktivität eine interessante Alternative zu dem Funkbetrieb auf den unteren Kurzwellenbändern. Die Planungen zu geosynchronen und geostationären Satelliten lassen aber einen Quantensprung in den Möglichkeiten dieser Art der Kommunikation erwarten.

7. Anhang

7.1 Der geostationäre Satellit

Berechnung der Energie um eine Masse von 1kg von der Erdoberfläche (Äquator) in eine geostationäre Umlaufbahn zu befördern.

$$E_p = \int_{h_0}^h f(s) ds; \text{ mit } E_p = \text{potentielle Energie}$$

$$E_p = \int_{h_0}^h \frac{G m_E m}{s^2} ds;$$

$$E_p = G M_E m \int_{h_0}^h \frac{1}{s^2} ds;$$

$$E_p = G m_E m \left(\frac{1}{h_0} - \frac{1}{h} \right);$$

mit $G = \text{Gravitationskonstante} = 6,674 * 10^{11} \frac{m^3}{kgs^2};$

$$m_E = \text{Erdmasse} = 5,972 * 10^{24} \text{ kg};$$

$$h_0 = \text{Erdradius am Äquator} = 6,378 * 10^6 \text{ m};$$

$$h = \text{Satellitenhöhe} = 4,216 * 10^7 \text{ m};$$

$$m = \text{Testmasse} = 1 \text{ kg};$$

Setzt man die Zahlen in die Gleichung ein erhält man:

$$E_p = 1 \text{ kg} * 6,674 * 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2} * 5,972 * 10^{24} \text{ kg} \left(\frac{1}{6,378 * 10^6 \text{ m}} - \frac{1}{4,216 * 10^7 \text{ m}} \right);$$

$$E_p = 5,301 * 10^7 \frac{kgm^2}{s^2} = 5,301 * 10^7 \text{ Nm};$$

Funkbetrieb über Satelliten

Zur potentiellen Energie kommt noch die kinetische

$$E_k = \frac{m}{2} v^2 - \frac{m}{2} v_0^2;$$

$$E_k = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{2h\pi}{t} \right)^2 - \left(\frac{2h_0\pi}{t} \right)^2 \right]; \text{ mit } t = \text{Umlaufzeit} = 23\text{h}56\text{min}4\text{s}.$$

$$E_k = \frac{2m\pi^2}{t^2} (h^2 - h_0^2);$$

Setzt man die Zahlen ein erhält man die aufzuwendende kinetische Energie:

$$E_k = \frac{2\pi^2 * 1\text{kg}}{8,6164^2 * 10^8 \text{s}^2} (4,215^2 * 10^{14} \text{m}^2 - 6,378^2 * 10^{12} \text{m}^2) = 4,618 * 10^6 \text{Nm};$$

Die insgesamt aufzuwendende Energie ist

$$E = E_p + E_k = 5,301 * 10^7 \text{Nm} + 4,618 * 10^6 \text{Nm} = 5,763 * 10^7 \text{Nm} = 16\text{kWh};$$

7.2 Der geosynchrone Satellit

In diesem Beispiel soll der Energiebedarf ausgerechnet werden der nötig ist um 1kg in eine geosynchrone Umlaufbahn mit einer minimalen Höhe von 8000km (= 1613km über dem Erdboden) zu bringen.

$$E_p = G m_E m \left(\frac{1}{h_0} - \frac{1}{h_{min}} \right);$$

Mit Zahlen ergibt das:

$$E_p = 1\text{kg} * 6,674 * 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}^2} * 5,972 * 10^{24} \text{kg} \left(\frac{1}{6,378 * 10^6 \text{m}} - \frac{1}{8 * 10^6 \text{m}} \right) = 1,708 * 10^7 \text{Nm};$$

Die kinetische Energie ist:

$$E_k = \frac{m}{2} v^2 = \frac{m}{2} * G * M_E \left(\frac{2}{h_{min}} - \frac{1}{h} \right); \text{ mit } h_{min} = \text{minimale Höhe};$$

Setzt man Zahlen ein, so erhält man:

$$E_k = \frac{1\text{kg} * 6,674 * 10^{-11} \text{m}^3 * 5,972 * 10^{24} \text{kg}}{2\text{kg}^2} \left(\frac{2}{8 * 10^6 \text{m}} - \frac{1}{4,216 * 10^7 \text{m}} \right) = 4,510 * 10^7 \text{Nm};$$

Die insgesamt aufzuwendende Energie ist

$$E = E_p + E_k = 1,708 * 10^7 \text{Nm} + 4,510 * 10^7 \text{Nm} = 6,218 * 10^7 \text{Nm} = 17,3 \text{kWh};$$

7.3 Satellit mit niedriger Umlaufbahn

Berechnung der Energie um eine Masse von 1kg von der Erdoberfläche (Äquator) in eine Umlaufbahn von 600km Höhe zu befördern.

Funkbetrieb über Satelliten

$$E_p = G m_E m \left(\frac{1}{h_0} - \frac{1}{h_{600}} \right);$$

Setzt man die Zahlen in die Gleichung ein erhält man:

$$E_p = 1 \text{ kg} * 6,674 * 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2} * 5,972 * 10^{24} \text{ kg} \left(\frac{1}{6,378 * 10^6 \text{ m}} - \frac{1}{6,978 * 10^6 \text{ m}} \right) = 5,373 * 10^6 \text{ Nm};$$

Für die Bestimmung der kinetischen Energie ist die Geschwindigkeit und damit die Umlaufzeit zu berechnen.

$$t = \left(\frac{4\pi^2 h^3}{Gm_E} \right)^{1/2};$$

In Zahlen:

$$t_{600} = \left(\frac{4\pi^2}{6,674 * 10^{-11} * 5,972 * 10^{24}} 6,978^3 * 10^{18} \right)^{1/2} \text{ s} = 5801 \text{ s};$$

Die kinetische Energie:

$$E_k = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{2\pi h_{600}}{t_{600}} \right)^2 - \left(\frac{2\pi h_0}{t_0} \right)^2 \right] = 2\pi^2 m \left[\left(\frac{h_{600}}{t_{600}} \right)^2 - \left(\frac{h_0}{t_0} \right)^2 \right];$$

in Zahlen:

$$E_k = 2\pi^2 * 1 \text{ kg} \left[\left(\frac{6,978 * 10^6 \text{ m}}{5,801 * 10^3 \text{ s}} \right)^2 - \left(\frac{6,378 * 10^6 \text{ m}}{8,614 * 10^4 \text{ s}} \right)^2 \right] = 2,845 * 10^7 \text{ Nm};$$

Die insgesamt aufzuwendende Energie ist

$$E = E_p + E_k = 5,373 * 10^6 \text{ Nm} + 2,845 * 10^7 \text{ Nm} = 3,382 * 10^7 \text{ Nm} = 9,4 \text{ kWh};$$

8. Quellenverzeichnis

Martin Davidoff, K2UBC „The Satellite Experimenter's Handbook“ 2nd Edition

ARRL Order No. 3185 ISBN 0-87259-318-5

Oviver Montenbruck, Thomas Pfleger „Astronomie mit dem Personal Computer“ 4. Auflage

Springer Verlag ISBN 978-3-540-21204-1