

Voyager, AMSAT-DL und die Entwicklung des interplanetaren Amateurfunks



Achim Vollhardt, DH2VA/HB9DUN
AMSAT-DL JHV 2007,
IUZ Bochum



Übersicht

Voyager :

- Rückblick
- Nachbereitung
- Empfang am 31.3.2006

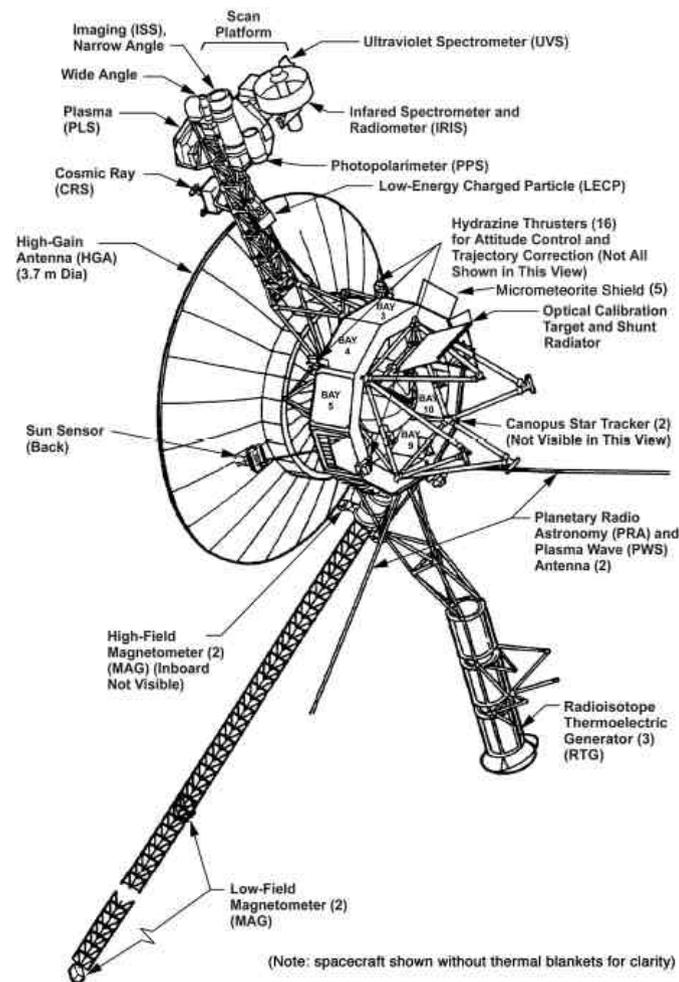
Interplanetarer Amateurfunk

- Grundlagen
- Skalierbarkeit
- Notwendige Hardware
- Typische Stationen
- Entwicklungen im letzten Jahr
- Empfohlene Sonden
- Amateur-DSN group
- Ausblick



Voyager Raumsonden

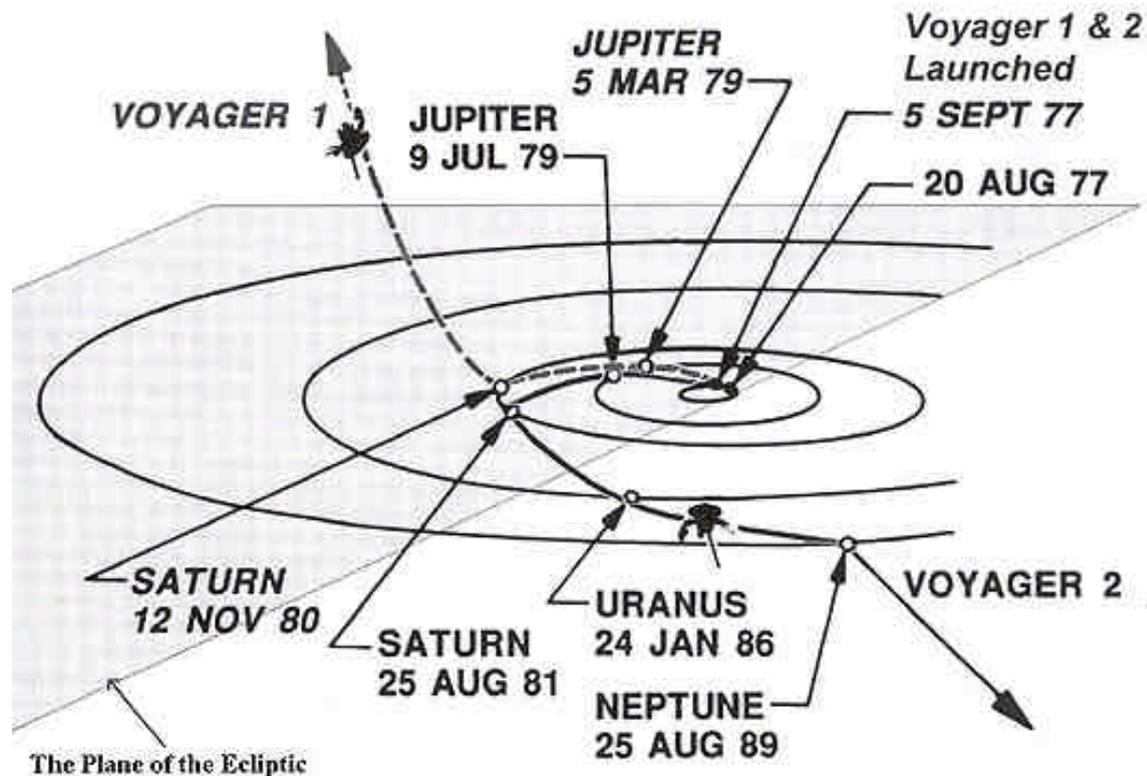
- dreiachsenstabilisiert
- HGA 3.74 m Durchmesser
- Radioisotopen Thermoelektrischer Generator (RTG)
- Missionsdauer bestimmt durch
 - Hydrazin Treibstoff (2040)
 - RTG Leistung (2020)
 - Geld (4 Mill. USD pro Jahr)
- Magnetometer auf 13 m langem Mast
 - Wird ca. 6x pro Jahr kalibriert (MAGROL)





Wo sind die Raumsonden heute?

- Voyager 1:
100 AU
(nach Norden)
- Voyager 2:
82 AU
(nach Süden)



© NASA/JPL



Ein-Weg 'Radar' Gleichung

Standard Version:

$$\begin{aligned}\text{Path loss [dB]} &= 20\log(fR) + 20\log(4\pi/c) \\ &= 20\log(fR) + (-147.55 \text{ dB}) \quad (f= [\text{Hz}], R=[\text{m}])\end{aligned}$$

- Setze $f= 8.4 \text{ GHz}$ und verwende Astronomische Einheiten (AU) fuer $R \rightarrow$

DH2VA Version:

$$\text{Path loss [dB]} = 20\log(R) + 274.4 \text{ dB} \quad (R=[\text{AU}])$$



Was mache ich damit?

- 1 AU Entfernung → path loss = 274.4 dB
- 1.5 AU (Venus heute) → path loss = 276.2 dB
- 2.5 AU (Mars heute) → path loss = 278.8 dB
- 100 AU Entfernung → path loss = 314.4 dB

1. EIRP des Resttraegers:
Sendeleistung + Antennengewinn – Traegerunterdrueckung
2. Path loss abziehen
3. Gewinn der Empfangsantenne addieren
4. Vergleiche mit Empfaengerrauschen in einer Bandbreite von 1 Hz
5. Ergebnis: Signal-Rausch Verhaeltnis in 1 Hz Bandbreite



Sendeseite

EIRP einiger Raumsonden (DESCANSO + Google):

- MRO:
100 W (50 dBm) + 3m Spiegel (45.5 dBi) = 95.5 dBm (3.5 MW !)
Unterdrueckung -10 dB: 85.5 dBm
- VEX:
65 W (48.1 dBm) + 1.3m Spiegel (38.3 dBi) = 86.4 dBm (436 kW)
Unterdrueckung -10 dB: 76.4 dBm
- Voyager 1:
18 W (42.5 dBm) + 3.74m Spiegel(48.2 dBi) = 90.7 dBm (1 MW)
Unterdrueckung -6 dB: 84.7 dBm



Receive side

- Antennengewinn

$$G = 10^*_{10} \log(\eta^* (\pi^* D/\lambda)^2)$$

- Systemtemperatur (bzw. Rauschzahl) → Rauschleistung in 1 Hz

$$P = k^* T_{\text{sys}}^* B$$



Parameter von Bochum

- Durchmesser : 20 m
- Effizienz: 55%
- Gewinn: $G = 61.9$ dBi
- Mondrauschen : 3.3 dB \rightarrow $T_{\text{sys}} = 189$ K
 $P = k * T * B = \underline{\underline{-175.8 \text{ dBm}}}$

Raumsonde	EI RP	Path loss	Gewinn	Rauschen	SNR (1 Hz)
VEX	76.4	276.2	61.9	-175.8	37.9
MRO	85.5	278.8	61.9	-175.8	44.4
Voyager 1	84.7	314.4	61.9	-175.8	8.0



Empfangsprinzip

- Abhaengig von der Signalstaerke:
 - 40 dBHz: einfach im Lautsprecher zu hoeren
 - 20 dBHz: kann mit Kopfhoerern wahrgenommen werden
 - <20 dBHz: erfordert DSP (Soundkarte)
 - <10 dBHz: erfordert Integrationszeiten >1 Sekunde
- Stelle Signalpegel vs. Audiofrequenz dar (Fourierdiagramm)
- Wasserfall Diagramm: farbig dargestellte Signalstaerke, zeichne eine Zeile pro Integrationsperiode
- Integration: Mittelung ueber mehrere FFT's und zeichne nur eine Zeile fuer x FFT Ergebnisse:
Rauschen mittelt sich aus, waehrend das Signal konstant bleibt



Frequenzreferenzen (I)

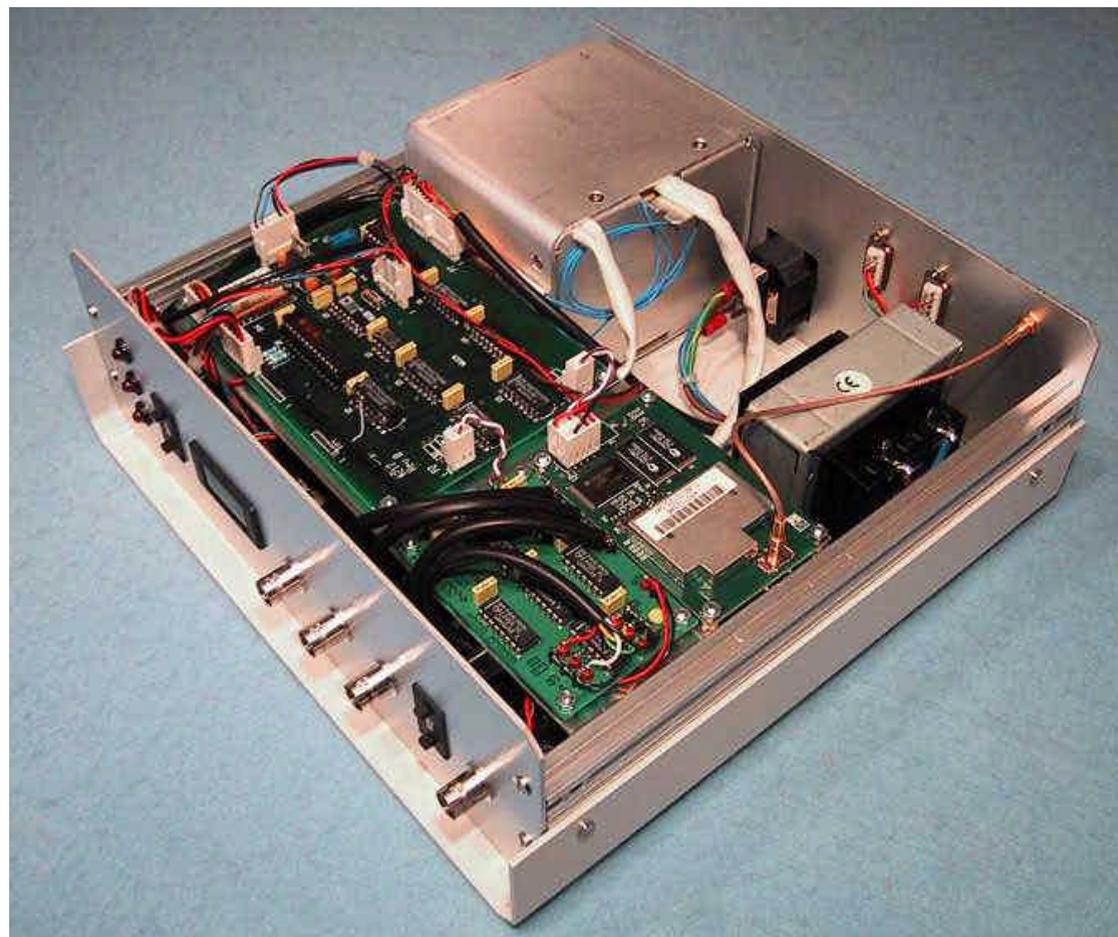
Wir brauchen eine genaue UND stabile Referenzfrequenz!

- Genauigkeit:
Stimmt Deine Anzeige mit der tatsächlichen Empfangsfrequenz überein?
→ benötigt um das Signal zu finden
~ 100 Hz auf 8.4 GHz ist ausreichend: 10^{-8}
- Stabilität:
Bleibt Deine Empfangsfrequenz für die nächsten 60 Sekunden konstant?
→ wichtig für lange Integrationszeiten (60 – 1000 Sekunden)
~ 1 Hz auf 8.4 GHz = 10^{-10} @ $\tau = 1000$ Sek.



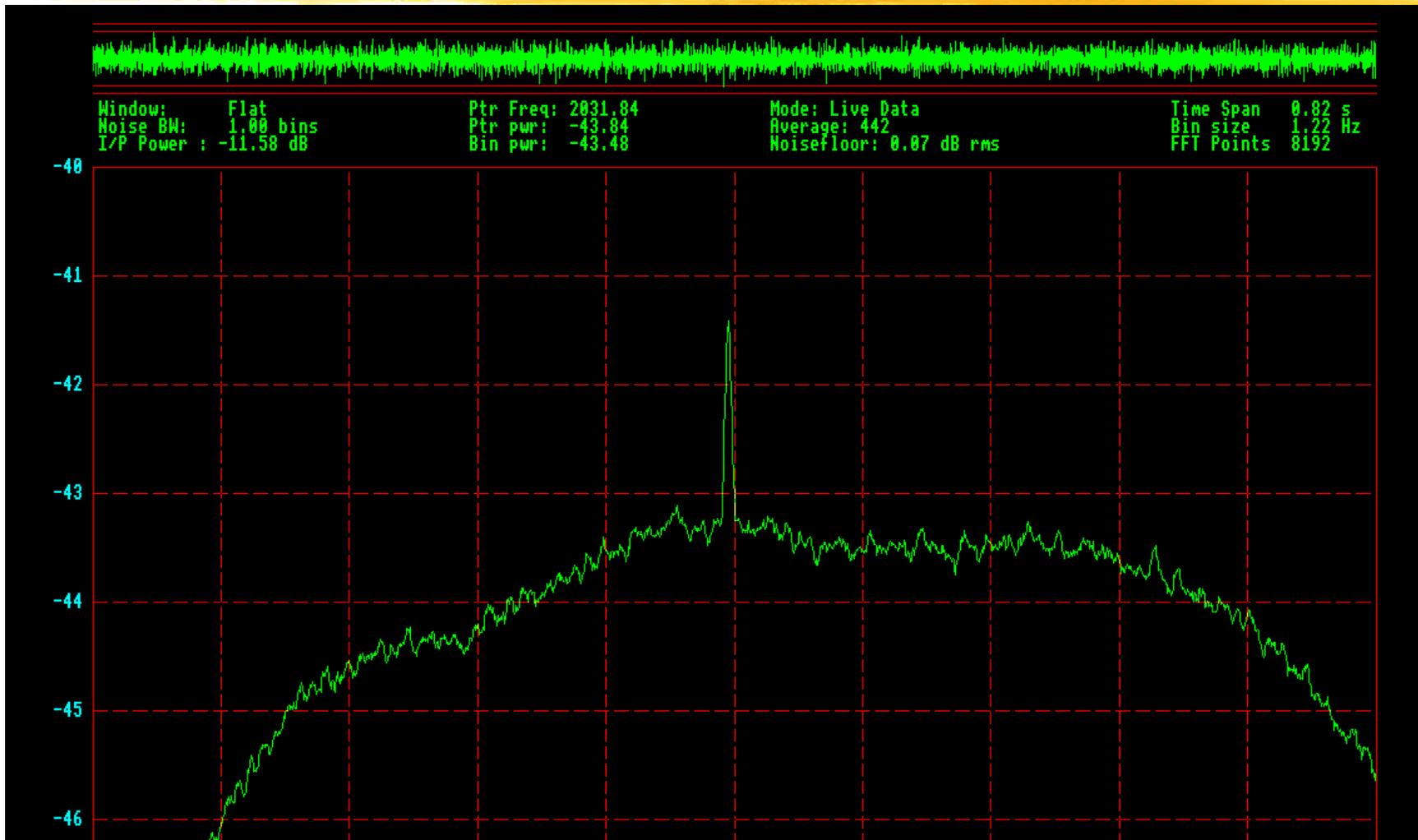
Frequenzreferenzen (II)

- Gut dokumentiert und ausreichend stabil:
G3RUH's GPS stabilisierter OCXO (siehe Google..)
- Zwei eigene, ähnliche Geräte aus Ebay-Teilen mit seiner Hilfe gebaut
- Rubidium/Caesium-Normal ist auch ok, wenn vorhanden 😊



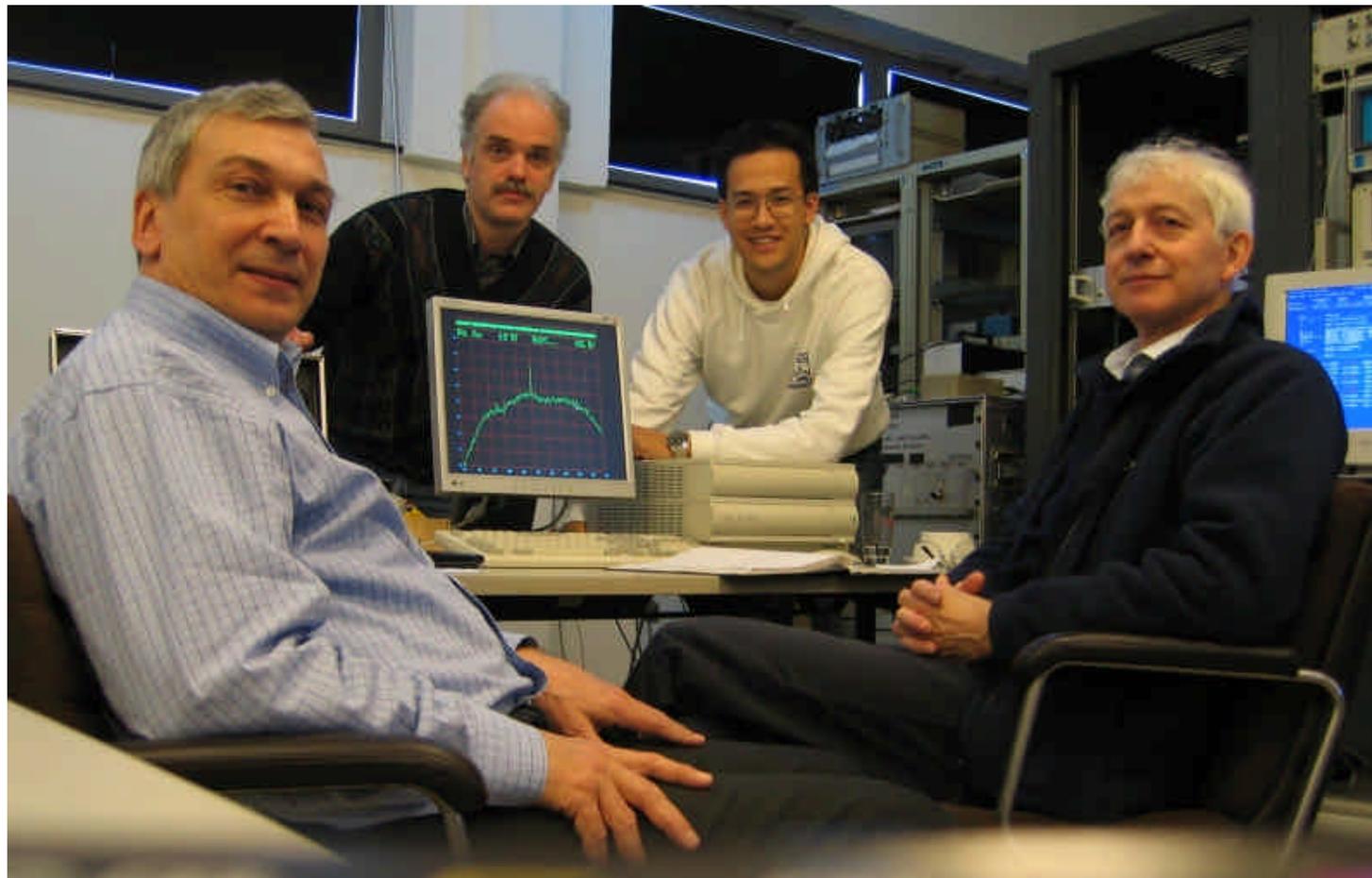


DAS Signal





DAS Foto



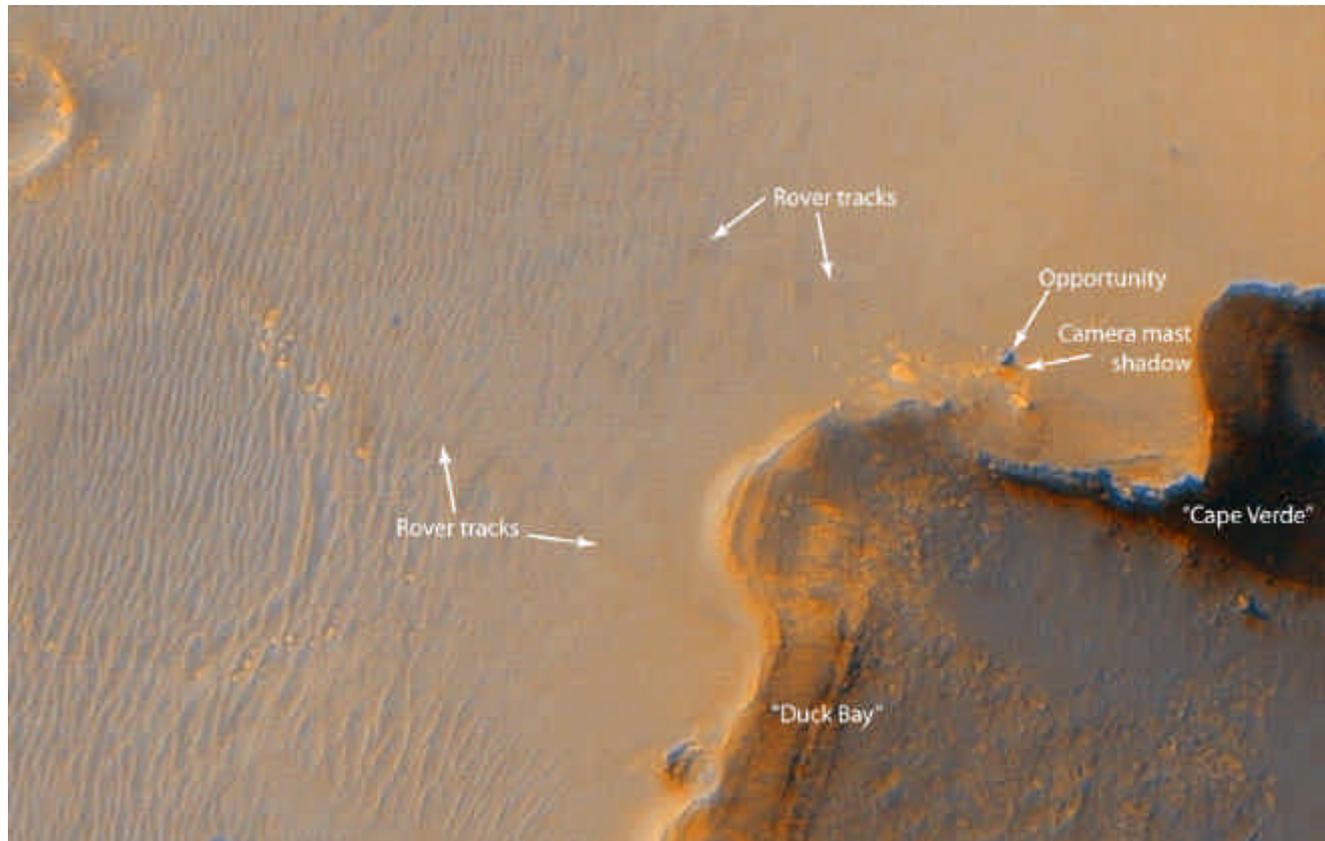


Plaene fuer Bochum

- Austausch der provisorischen Installation durch permanentere Gerate:
 - SMA Relais zur Polarisationsumschaltung (Septum) !
 - 2. LNA for zweite Polarisation
 - Installiere feste 10 MHz Referenzaufbereitung
 - Leite Konverter LO von Referenz ab (s. u.)
- Verwende HPSDR als Empfaenger (www.hpsdr.org) :
 - Fernsteuerbar via Internet
 - 200 kHz Bandbreite (vergl. 3 kHz beim FT-736)
 - Moegliche Telemetriedekodierung kann in Firmware integriert werden
 - Kohaerente Signalverarbeitung (Interferometrie?)
- Noch viele andere 'bits and pieces' ..



Was wir NICHT empfangen koennen:

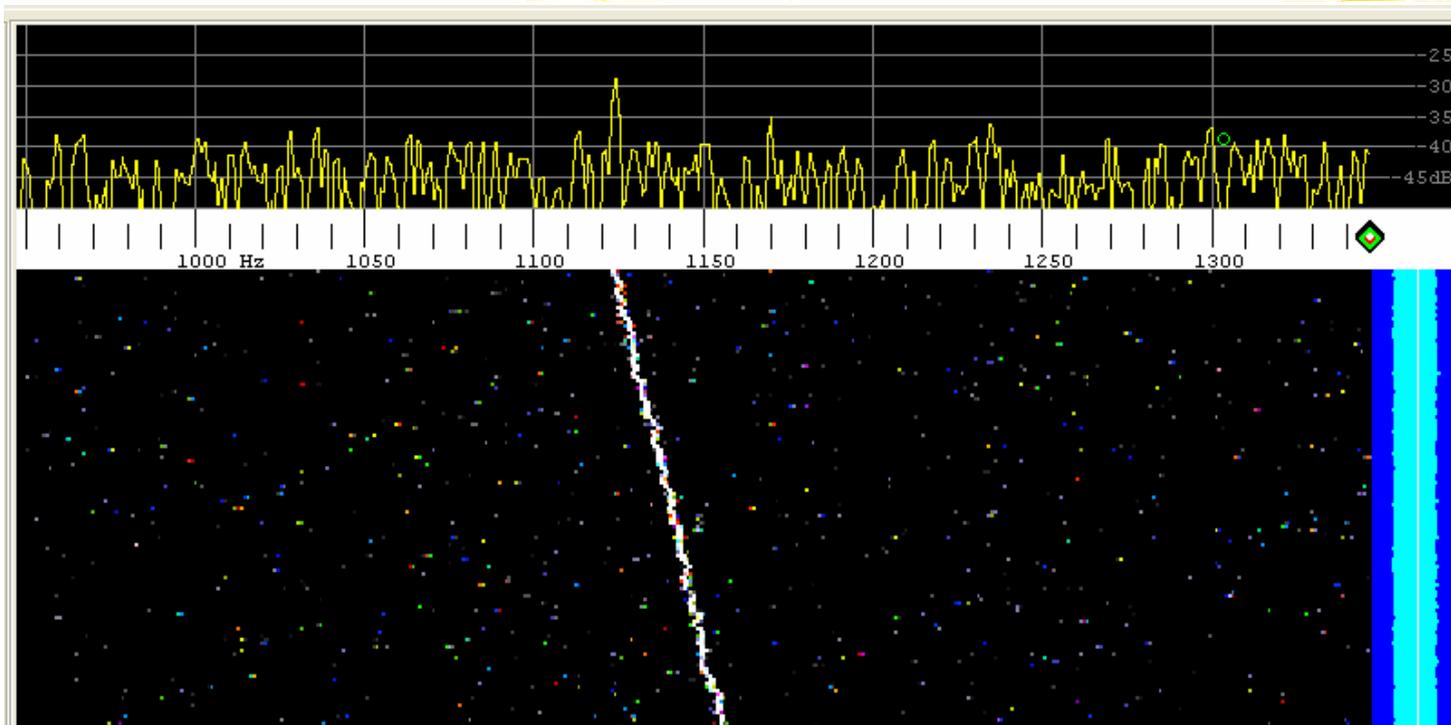


(© NASA/JPL/UA)

Antennengroesse des NASA Deep Space Network: 34-70 m



WAS wir empfangen koennen:



- Frequenz: 8400-8450 MHz
- biphase PSK Modulation
- Resttraeger: 6-10 dB



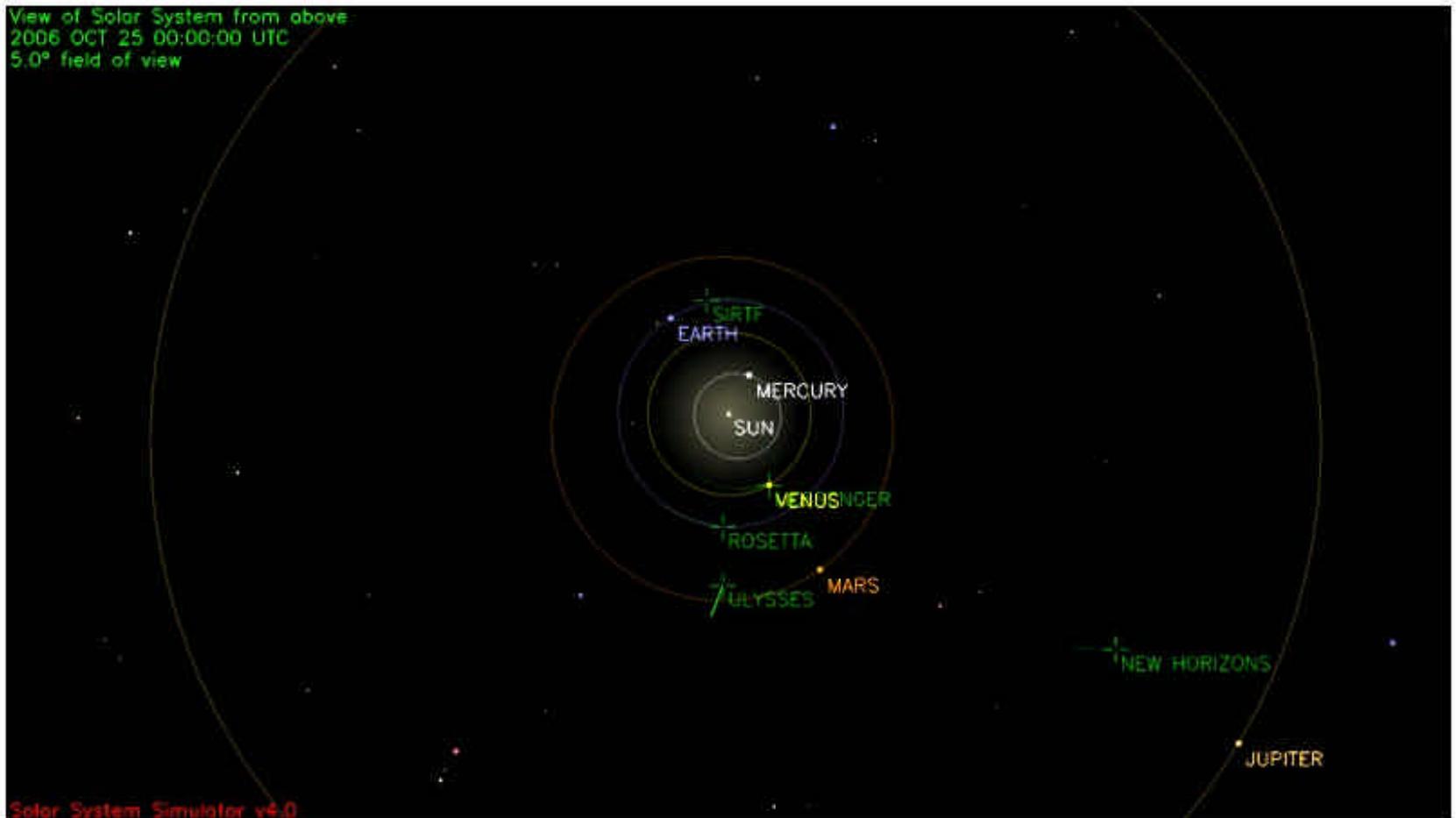
Skalierbarkeit

- 20 m bei 100 AU entspricht 20 cm bei 1 AU
- Etwas Reserve:
120 cm SAT-TV Schuessel (Ebay)
- Raumsonden bei ca. 1-3 AU:
MRO, VEX, SIRTf, ROSETTA, MEX, ULYSSES, STEREO-A/B
- Kopfhörer ausreichend fuer Konjunktion von Venus und Mars, Soundkarte fuer restliche Teile der Umlaufbahnen benoetigt



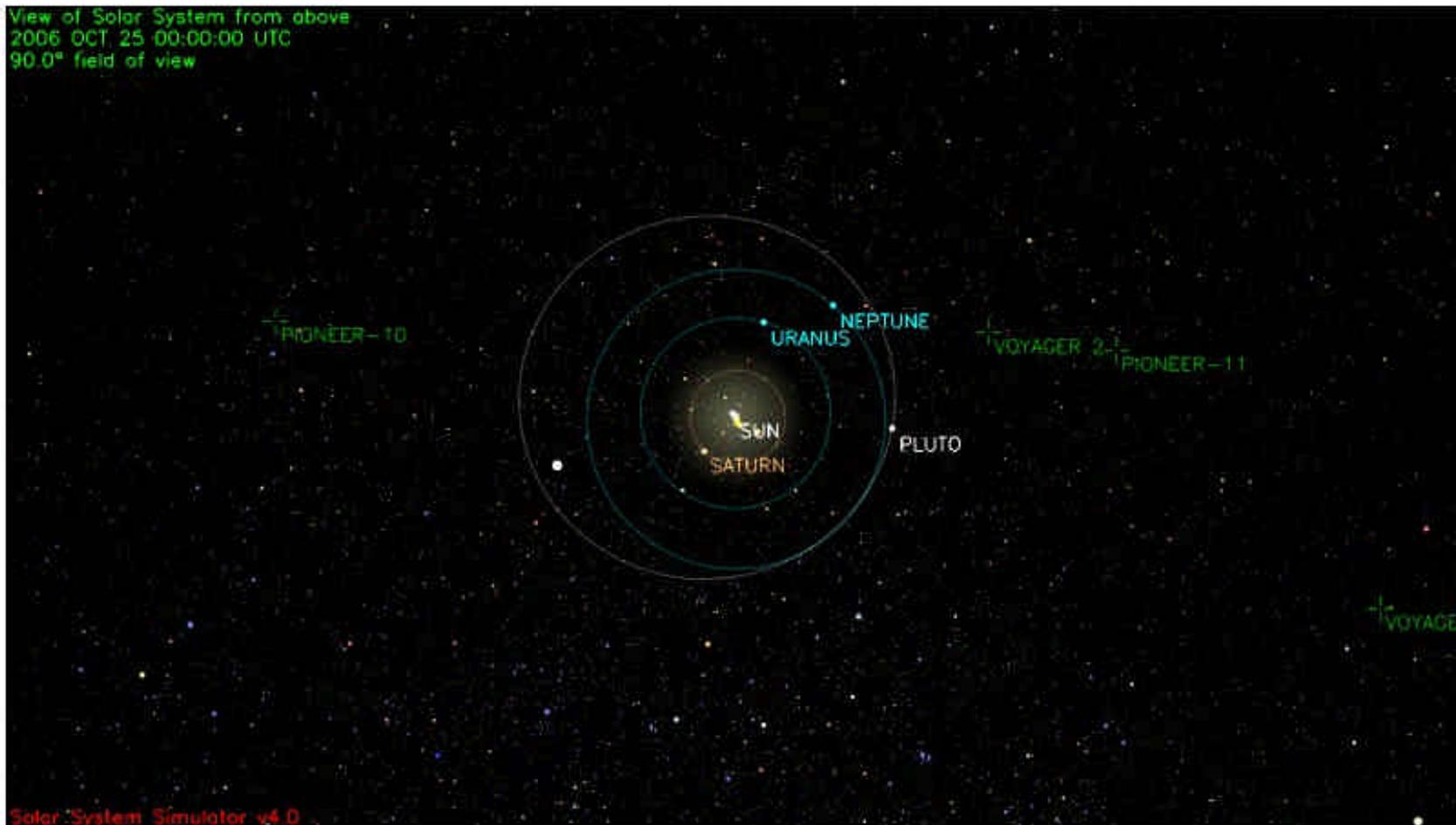


Situationsplan





Situationsplan





Notwendige Hardware

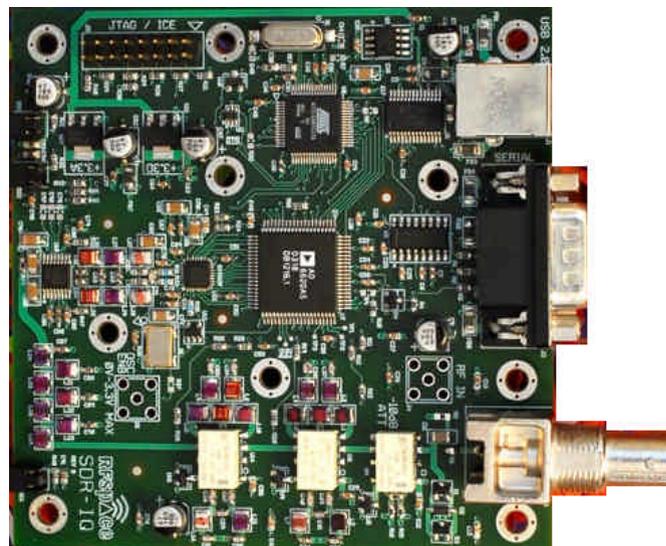
- Empfohlene Spiegelgrösse:
mind. 1-1.5 m, 2-4 m scheint optimal
- Feed: open-waveguide oder W21 MU dual mode horn
- Polarisation: rechtszirkular,
entweder mit Teflon L/4 Plate oder Septum
- LNA: DB6NT oder Eigenbau
- Konverter: DB6NT, Eigenbau oder Ebay
- GPS stabilisierter OCXO : Ebay 😊

- Nachsetzer: moeglichst kleine VFO Schrittweite
- PC: Soundkarte + Spectrum Laboratory von DL4YHF



Breitbandempfang

- Detektionsbandbreite = Audiobandbreite des RX
- SSB Bandbreite: 3 kHz
- Einfache Erweiterung: Anzapfen der 10.7 MHz ZF mit Softrock RX (48-96 kHz)
- Noch mehr Bandbreite: SDR-I Q (190 kHz)





Position der Sonde

- HORIZONS Server der NASA:
ssd.jpl.nasa.gov
- Berechnet :
RA/DEC
auch AZ/EL
'deldot'
- funktioniert nur bei
freifliegenden
Sonden
- Bei Sonden um einen
Planeten muss der
Planet als Ziel
angegeben werden

NASA Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

+ View the NASA Portal
+ Near-Earth Object (NEO) Project

Search JPL

JPL HOME EARTH SOLAR SYSTEM STARS & GALAXIES TECHNOLOGY

Solar System Dynamics

BODIES ORBITS EPHEMERIDES TOOLS PHYSICAL DATA DISCOVERY FAQ SITE MAP

HORIZONS Web-Interface

This tool provides a web-based *limited* interface to JPL's HORIZONS system which can be used to generate ephemerides for solar-system bodies. Full access to HORIZONS features is available via the primary [telnet interface](#). HORIZONS system news shows recent changes and improvements. A [web-interface tutorial](#) is available to assist new users.

Current Settings

Ephemeris Type [\[change\]](#) : OBSERVER
Target Body [\[change\]](#) : Cassini Spacecraft [-82]
Observer Location [\[change\]](#) : Zurich Switzerland (8°31'59.9"E, 47°22'00.1"N)
Time Span [\[change\]](#) : Start=2006-10-22 17, Stop=2006-10-22 18, Step=10 m
Table Settings [\[change\]](#) : QUANTITIES=1,2,4,20,23; angle format=DEG
Display/Output [\[change\]](#) : default (formatted HTML)

Special Options:

- [set default geocentric observer settings](#) (preserves only the selected target body)
- [reset all settings to their defaults](#) (caution: all previously stored/selected settings will be lost)
- [show "batch-file" data](#) (for use by the E-mail interface)

ABOUT SSD CREDITS/AWARDS PRIVACY/COPYRIGHT GLOSSARY LINKS

FIRSTGOV Your First Click to the U.S. Government

2006-Oct-25 21:28 UT
(server date/time)

NASA Site Manager: Donald K. Yeomans
Webmaster: Alan B. Chamberlin



Antennenausrichtung

- Spiegelnachführung kritisch: Antennenkeule ca. 1 Grad weit
- Entweder gut kalibriertes Festsystem (welche Rotoren machen 1 Grad?) oder stabiles Portabelsystem
- Portabelsystem: schweres+stabiles Stativ (grosses Fotostativ, Vermesserstativ, alte Holzstative), u.U. mit Gewicht beschwert
- Mechanische Elevationswinkelanzeige (Baumarkt) hinten am Spiegel befestigen
- Azimutskala am Stativ, Kalibration durch optische Peilung an bekannten Punkten (Karte!) am Horizont (1 Grad = 2 Monddurchmesser)



Frequenzmanagement

- Frequenzen der Raumsonden verhältnismässig gut bekannt:
36 DSN Kanäle zwischen 8400-8450 MHz
- Frequenzbelegung schon ca. 50% !
- Mars Rover 'Spirit' und MRO haben gleiche Frequenz !
- Unsicherheiten:
 - verschiedene Dopplerkomponenten
 - eigene Empfangsfrequenz
 - Sendefrequenz der Sonde:
 - Sendesignal oft in fester Beziehung zur verwendeten Uplinkfrequenz (Kohaerentes Tracking)



Dopplerverschiebung

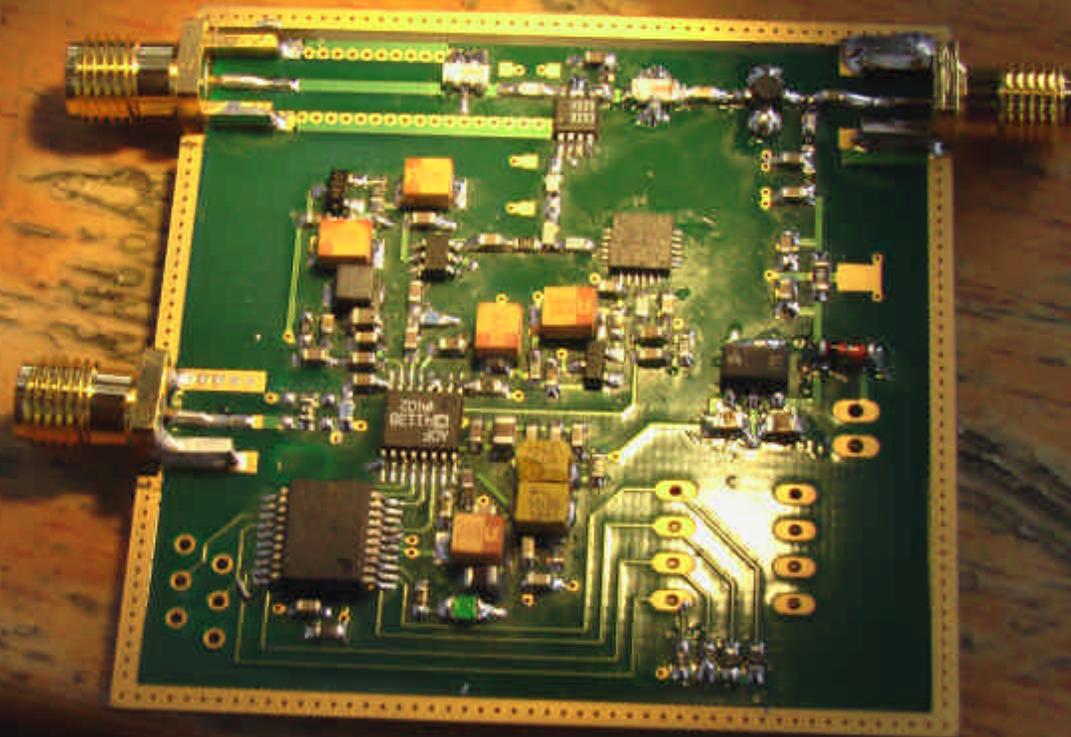
- Doppler:
 - 1) Erddrehung
 - 2) Relativbewegung Erde-Sonde/Mars/Venus
 - 3) evtl. Bewegung der Sonde um Mars/Venus
 - 4) Verschiebung der Uplinkfrequenz
- 1)+2) kann durch die 'deldot' Angabe berechnet werden:
 $f^* = f_0 * (1 + \text{deldot}/c)$
- 3) ist nur ueber Kenntnis des Orbits um den Planeten moeglich (SPI CE Kernels: wir arbeiten daran..)
- 4) Bodenstationen fahren Uplink so, dass Doppler bei Sonde=0 und somit die Sendefrequenz gut mit der Dokumentation stimmt (einige kHz)



Konverter: Eigenbau

.. wird ein
erstaunlich
interessantes
Design !

10 Muster im Aufbau





Typische DSN Station ☺

Portable Demo-Anlage
von Freddy, ON6UG:

- 1.2m Gitterspiegel
- Open Waveguide feed
- Septum Polarizer
- DB6NT LNA +
Konverter
- FT-736

Typische Signalpegel:
16-20 dBHz



Raumsondenempfang ist durchaus mit kleinen Anlagen moeglich!
(wie immer: es kommt auf die Betriebstechnik an...)



Eigene Empfangsstation

- 90cm Gitterparabolspiegel auf Stativ eines Astro-Teleskopes
- Hornfeed fuer $f/D=0.5$, Teflonplate Polarizer
- Selbstbau LNA (Ist ein OM mit Rauschmessplatz im Raum..?)
- Selbstbau Konverter + GPS stabilisierter OCXO
- Empfaenger: TH-F7E Handfunke (warum nicht.. sonst FT-790)
- Laptop mit Spectrum Laboratory

Im Aufbau ...



Empfohlene Sonden

Raumsonden mit starken Signalen:

Entfernungen fuer November 2006

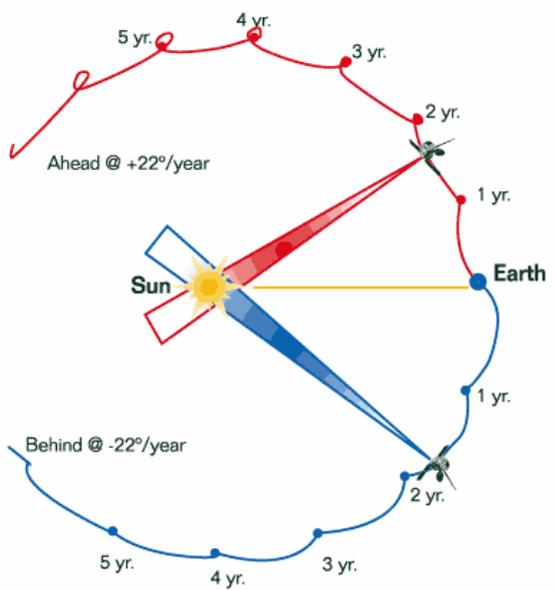
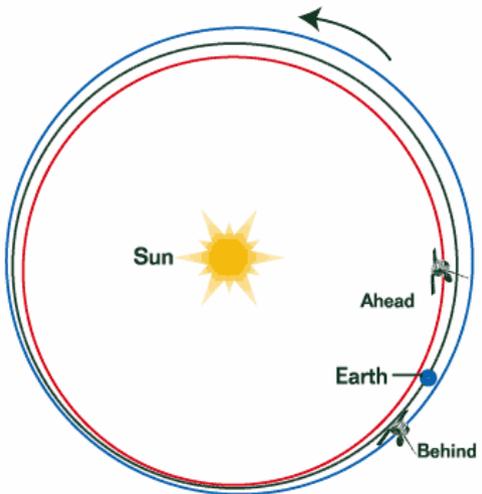
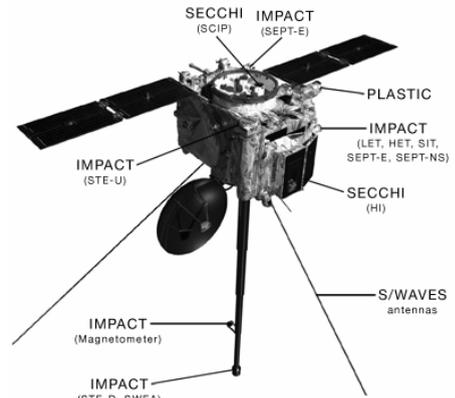
Signalpegel fuer $D=2\text{m}$, 50% Eff.

- MRO (P=85 dBm, R = 2.6 AU): 20 dBHz
- VEX (P=76 dBm, R = 1.5 AU): 16 dBHz
- ROSETTA (P=76 dBm, R= 1.9 AU): 15 dBHz
- SIRTFF (P=67 dBm, R = 0.3 AU): 20 dBHz
- STEREO (P=47 dBm, R = 7000-400000 km) > 38dBHz (!)



Listen to STEREO !

- STEREO: 2-Sonden Mission um Sonneneruptionen Richtung Erde zu detektieren
- Sonden im erdaehnlichen Sonnenorbit vor und hinter der Erde
- X-Band Downlink fuer planetare Distanzen konzipiert
- Beide STEREO Sonden fuer ca. 3 Monate in Erdorbit fuer Checkout!
- Erster RX Report 12h nach Start durch MOEYT !

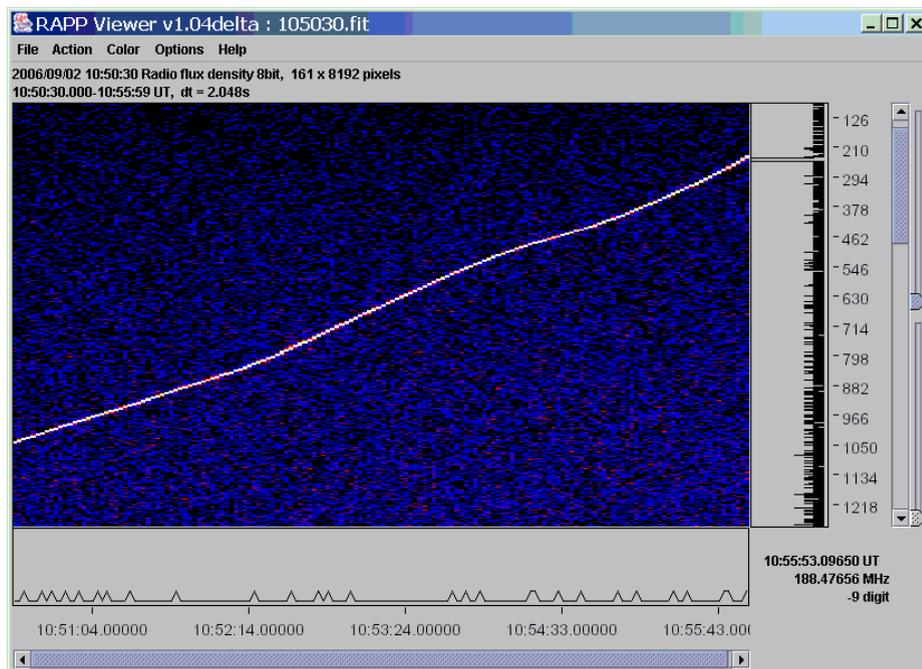




STEREO FFT plot



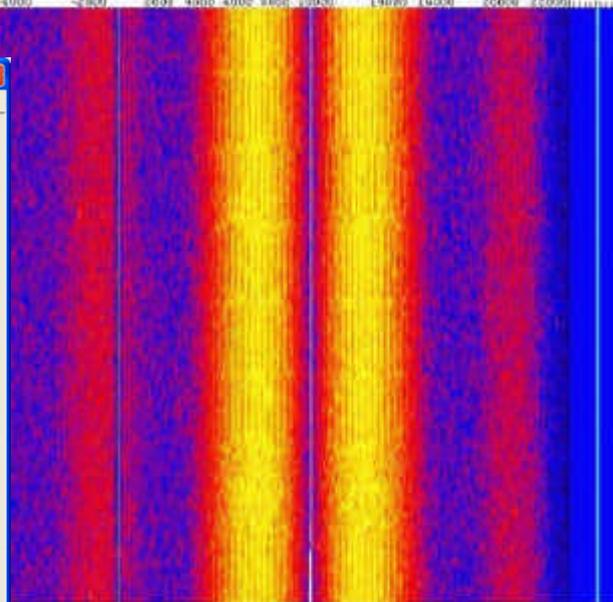
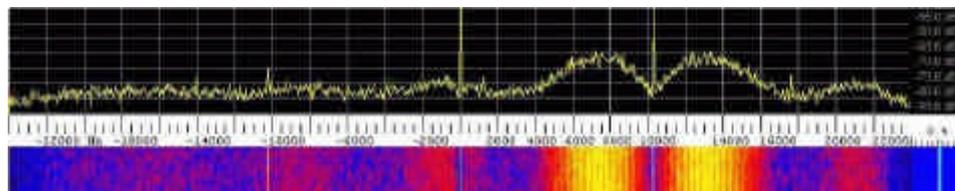
- 5m Parabolantenne



Vielen Dank an
Christian Monstein, HB9SCT!

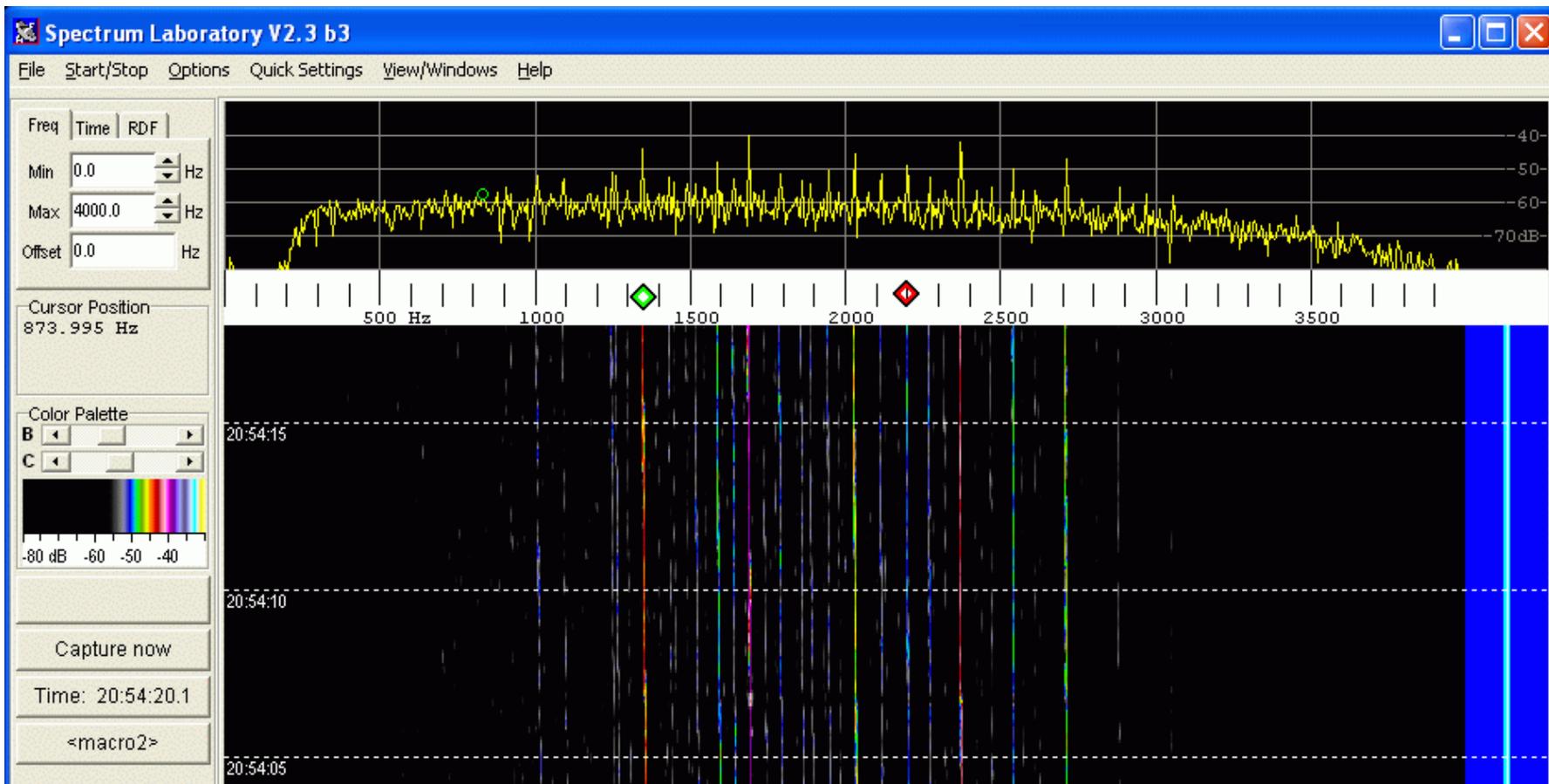


STEREO goes HIGH GAIN





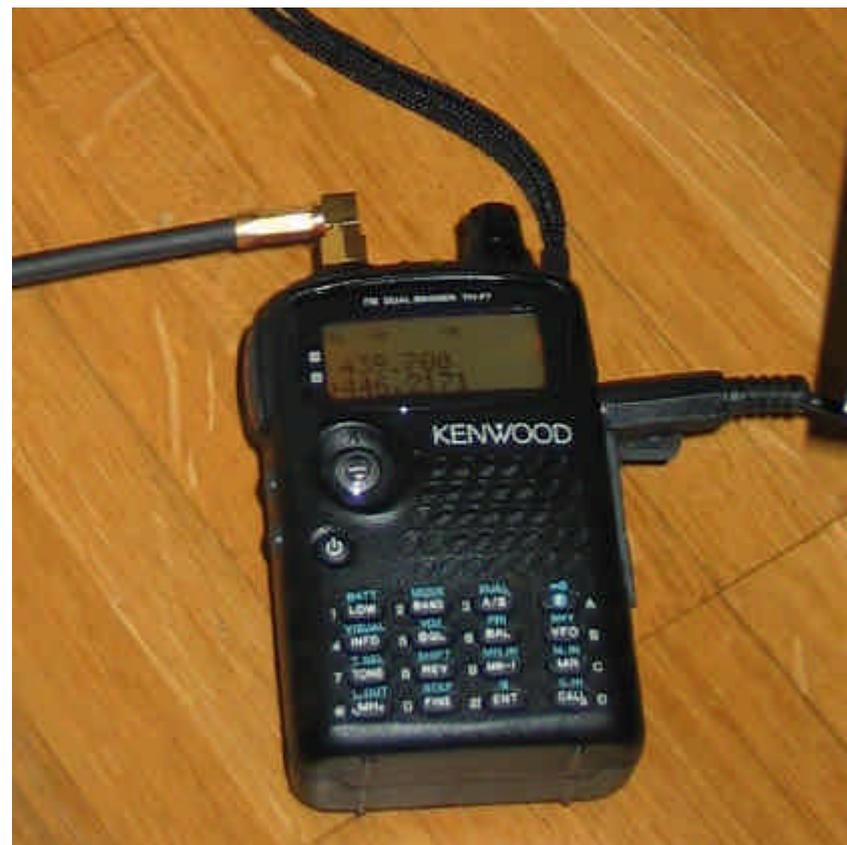
STEREO goes HIGH GAIN



Stereo-B, Distanz 733000 km



STEREO goes HIGH GAIN





Planetare Orbits

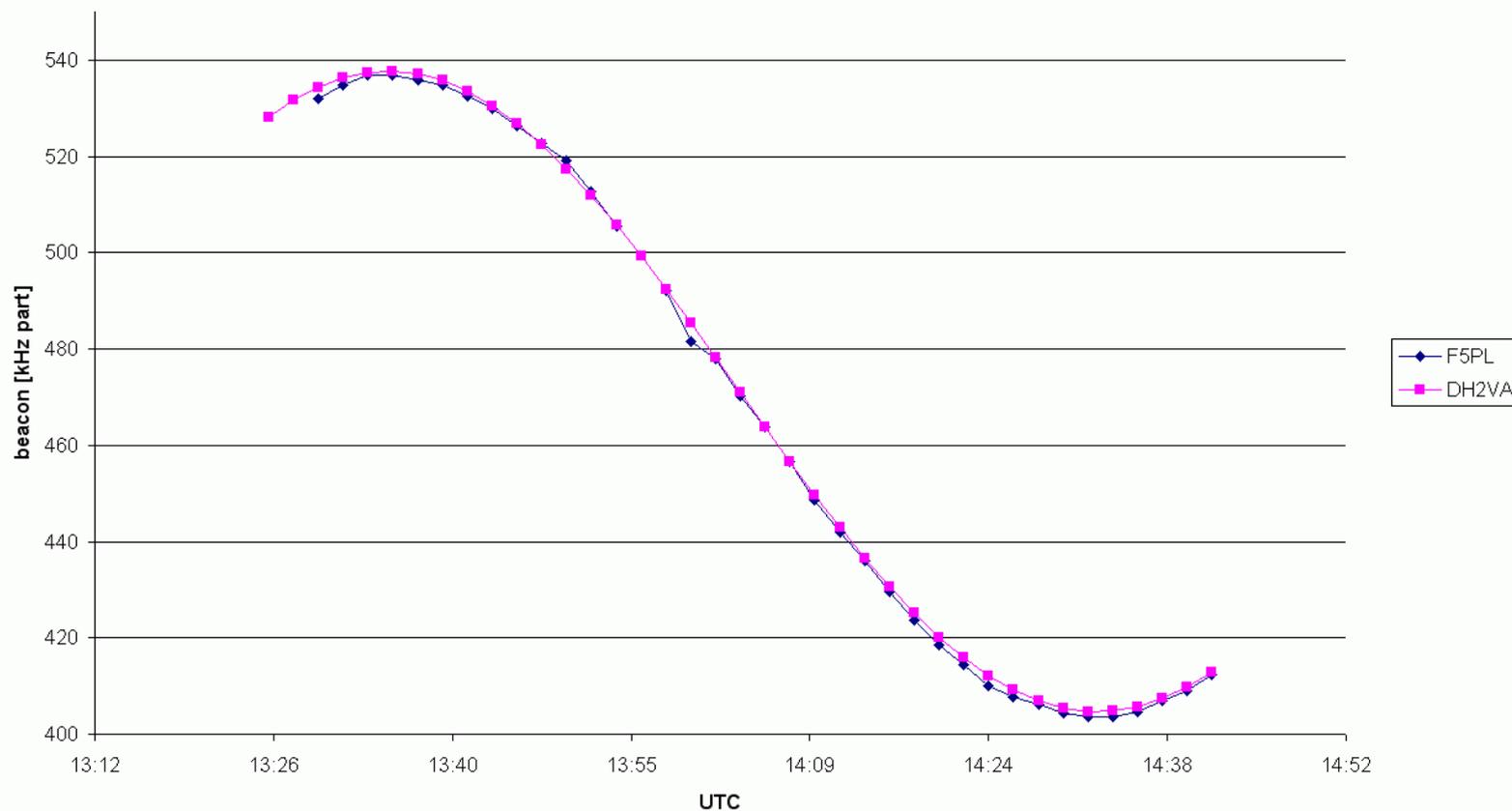
- sobald Orbiter in planetarer Umlaufbahn kommt Dopplershift der Geschwindigkeit auf dem Orbit hinzu
- Typische Dopplerverschiebungen bis zu ± 100 kHz
- Typische Detektionsbandbreite: 3 kHz (SSB): bis zu 70 Abstimmsschritte noetig!

- Ist die Raumsonde von der Erde ueberhaupt sichtbar?



MRO Doppler Prediction mit MATLAB

F5PL vs. DH2VA (Oct 12, 2006)





SPI CE Kernel Data

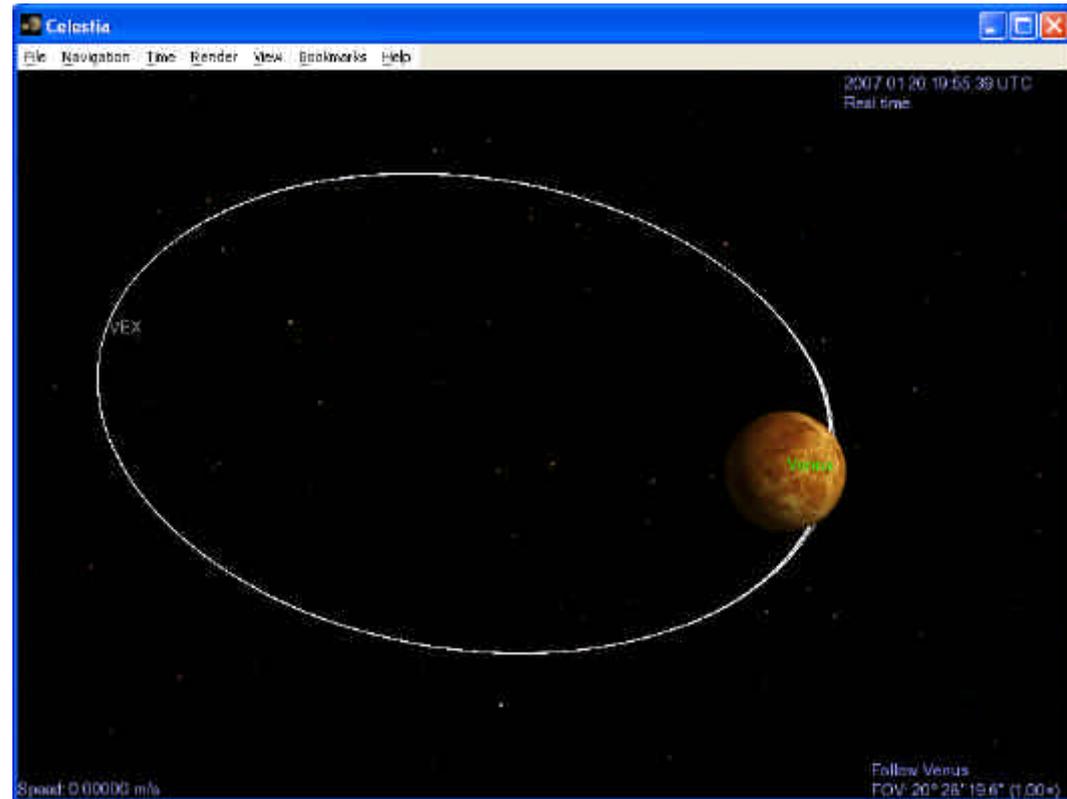


- SPI CE Kernels beschreiben sowohl Flugbahn als auch Ausrichtung einer Raumsonde
- Hauptverwendungszweck: Planung von Manoevern, Beobachtungen und Messungen. Dient auch zum operationellen Betrieb von Sonden
- Download der Kernel Daten unter:
<http://naif.jpl.nasa.gov/naif/data.html>
- Verfügbare für aktuelle und historische Missionen
- Komplette Dokumentation und Tools in 'C' verfügbar:
Achtung: Programmierer gesucht!



Celestia

- Echtzeit 3D-Astronomie Simulator
- Seit Version 1.5.0 (Beta) SPICE Kernel Unterstützung
- Light time travel delay inbegriffen
- Sichtbarkeitsueberpruefung
- AOS/LOS Vorausberechnung
- Genauigkeit ca. 1 min !





Amateur-DSN Gruppe

- Gruendung der 'Amateur-DSN' Yahoo group im Dezember 2005 durch Paul Marsh, MOEYT
- Mehr als 200 Mitglieder, Tendenz steigend
- Einige 'hardcore' Stationen (CT1DMK, EB3FRN, MOEYT, F5PL,...)
- Ca. ein Dutzend qrv auf 8.4 GHz, nochmal soviele Stationen im Aufbau
- Datenbank enthaelt Stationen und ihr Equipment
1 – 5 m Parabolspiegel sind am haeufigsten
GPS stabilisierte OCXO oder Rubidiumnormale sind recht verbreitet
- Details fuer Eigenkonstruktionen (Feedsysteme, Filter, ...) online
- Schnelle und direkte Hilfe fuer Einsteiger
- Regelmassige Empfangsberichte fuer diverse Raumsonden



Zusammenfassung

- Erster Empfang von Voyager 1 ueber 98 AU durch Funkamateure im Maerz 2006.
- Beweis der Leistungsfaeheigkeit der Bochumer Anlage.
- Durch Skalierung ergeben sich Moeglichkeiten fuer den einzelnen Funkamateur.
- Komponenten weder sehr teuer noch schwer erhaeltlich.
- Die Betriebstechnik macht es moeglich!
- Kleine, sogar portable Stationen ermoeeglichen Empfang ueber interplanetare Distanzen.
- Steigende Zahl von Funkamateuren beginnt mit dem Aufbau entsprechender Anlagen.



Vielen Dank!

Fuer Fragen:

dh2va@amsat.org

<http://groups.yahoo.com/groups/amateur-DSN>