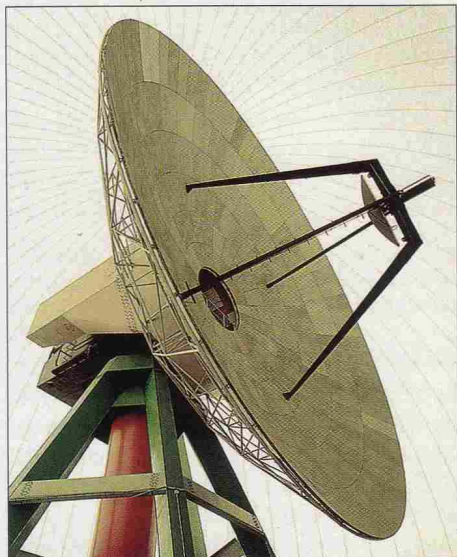


# Einmal Venus und zurück – das EVE-Experiment der AMSAT-DL

Dr. KARL MEINZER – DJ4ZC, u. a.<sup>1)</sup>

Was den Profis Ende der 50er- und Anfang der 60er-Jahre erstmals, u. a. mithilfe der riesigen Antennen in Jodrell-Bank (England) und Arecibo (Puerto Rico, USA) gelang, ist nun Funkamateuren am 20-m-Spiegel der Sternwarte Bochum und damit überhaupt erstmalig in Deutschland gelungen: der Empfang des eigenen, von der Venus reflektierten Funksignals. Im Folgenden wird auf interessante Besonderheiten der verwendeten technischen Ausrüstung eingegangen.

Die AMSAT-DL e.V. (Radio Amateur Satellite Corporation, Deutschland) gehört zu den wenigen Raumfahrtorganisationen, die Satellitenprojekte von der Planung über die Entwicklung und den Bau bis hin zum operativen Betrieb durchführen [7]. Für die



**Bild 1:** Die 20-m-Parabolantenne der Sternwarte Bochum steht der AMSAT-DL für die Kommunikation mit der geplanten P5-A-Marssonde zur Verfügung. Über sie erfolgte im März der EVE-Funkverkehr.

nächsten Jahre ist neben dem Kommunikationssatelliten P3-E – möglicherweise für das Startfenster 2018 – eine Weltraumsonde P5-A geplant, die den Mars erreichen und umrunden soll. Also Bodenstation ist die Sternwarte Bochum (IUZ) [8] in JO31OK vorgesehen. Bereits Mitte der 90er-Jahre wurde mit dem IUZ vereinbart, dass die AMSAT-DL die technische Betreuung und Modernisierung der Parabolantenne übernimmt. Im Gegenzug steht ihr die Antenne als primäre Kontrollstation für P5-A zur Verfügung.

Um die Kommunikationsmöglichkeiten unter Nutzung dieser 20-m-Parabolantenne zu testen, sendete unser Team, dem neben

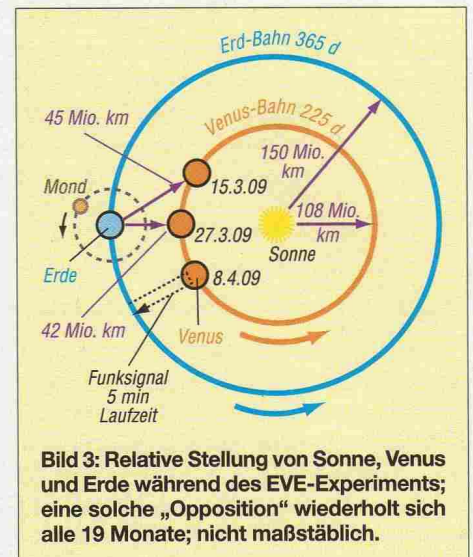
vielen anderen die Autoren der Beiträge [1] bis [6] angehörten, im März dieses Jahres auf dem 13-cm-Band CW-Signale zur Venus. Am 25.3.09 um 1028 UTC erschien das erste Echo dieser Signale auf dem Bildschirm des Auswertungs-PC. Wir hatten uns für die Experimente bewusst den Zeitraum um den 27.3. herum ausgesucht, weil die Venus in diesen Tagen ihre größte Annäherung an die Erde erreichte und dieser bis auf 42 Mio. km nahe kam. Das auf 5 kW verstärkte 2,45-GHz-Signal legte dabei einen Weg von fast 90 Mio. km zurück und kehrte nach etwa 5 min mit ungefähr 10 dB unter dem Rauschen an den Eingang der auf 10 Hz Bandbreite (siehe S. 927) eingestellten Empfangsanlage zurück.

Dies war das erste Mal, dass es in Deutschland gelang, planetare Echos zu empfangen. Zugleich ist es die größte Entfernung, die jemals im Amateurfunk überbrückt wurde, über 100-mal weiter als bei EME-Verbindungen.

## ■ Physik und Technik im Überblick

In den vergangenen Jahren hat die AMSAT die 20-m-Antenne in Bochum nach und nach für den P5-A-Kommandobetrieb ausgerüstet. Dabei wurde eine leistungsfähige Empfangsanlage für 10,5 GHz geschaffen. In jüngster Zeit erfuhr die Anlage durch einen 5-kW-Sender für 2,45 GHz eine Ergänzung.

Obleich uns klar war, dass dies eine enorme Herausforderung darstellen würde, fragten

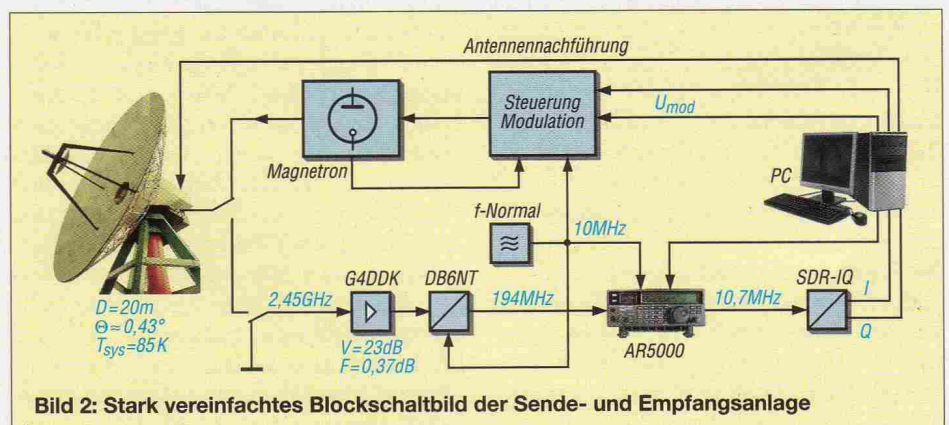


**Bild 3:** Relative Stellung von Sonne, Venus und Erde während des EVE-Experiments; eine solche „Opposition“ wiederholt sich alle 19 Monate; nicht maßstäblich.

wir uns schon frühzeitig, ob nicht auch mit dieser Anlage Echos an der Venus (EVE, Erde–Venus–Erde) zu erhalten wären. Die Venus nähert sich alle 19 Monate der Erde, und da sie fast so groß wie die Erde ist, zeigen die Rechnungen, dass Echos von der Venus leichter als von allen anderen Planeten zu bekommen sind.

Grundsätzlich funktioniert der Empfang von Radarechos auf höheren Frequenzen immer besser, weil pro Frequenzverdopplung der Antennengewinn um 6 dB steigt, für Sendung und Empfang also um 12 dB, während die Streckendämpfung nur 6 dB zunimmt.

Allerdings werden auf höheren Frequenzen die Anforderungen an Geräte und Antenne höher. Das Funksignal muss die Venusatmosphäre durchlaufen – diese ist 90-mal dichter als die Erdatmosphäre. Frühere Messungen haben gezeigt, dass die Venusatmosphäre bis 3 GHz keine nennenswerte Dämpfung verursacht und die Venus etwa 14 % der empfangenen Energie reflektiert. Bei 7,9 GHz war der Reflexionsfaktor durch atmosphärische Dämpfung schon auf 1 % abgesunken, und oberhalb dieser Frequenz ist die Dämpfung unbekannt. Nach unseren früheren Messungen auf 10,4 GHz muss der Reflexionsfaktor deutlich kleiner als 1 % sein.



**Bild 2:** Stark vereinfachtes Blockschnittbild der Sende- und Empfangsanlage

<sup>1)</sup> Der Beitrag ist ein redaktionell gekürzter und bearbeiteter Nachdruck von [1] bis [6] mit freundlicher Genehmigung der Autoren und der AMSAT-DL e.V.

Im Kasten rechts ist die Streckenberechnung für 2,45 GHz dargestellt. Diese Zahlen belegen, dass in der Tat auch mit einer kleinen Anlage wie in Bochum Venusechos empfangbar sind. Allerdings erfordert die geringe Bandbreite von 10 Hz, dass die Empfangsfrequenz immer mit 1 Hz bis 2 Hz Genauigkeit getroffen wird.

**Frequenzmanagement für P5-A in Bochum**

Für den kohärenten Transponder des P5-A sind sehr strikte Vorgaben bezüglich Stabilität und Genauigkeit der Frequenz einzuhalten. Der kohärente Transponder ar-

gebaut haben, die gestattet, alle Frequenzen bis zur 10,7-MHz-ZF herunter auch von unserem Standard abzuleiten. Der AR5000 kann in 1-Hz-Schritten, nicht aber in kleineren, abgestimmt werden. Damit ist unsere Hauptfrequenzunsicherheit durch diese Abstimmschrittweite gegeben.

Das zur Weiterverarbeitung der 10,7-MHz-ZF nachgeschaltete SDR ließ sich nicht anbinden und hat uns einen festen Frequenzfehler von 17 Hz gebracht. Zum Glück ist dessen Oszillator hinreichend konstant, sodass seine Drift in unserer Bandbreite von 10 Hz noch nicht gestört hat.



**Bild 4:** Freddy de Guchteneire, ON6UG, und das Horn; es besteht aus drei durch Blindnieten miteinander verbundenen 0,5 mm dicken Aluminiumblechen. Diese werden am Adapter mit einer großen Schlauchschelle gehalten, sodass ein perfekter Kontakt gewährleistet ist. Einige über das Horn geschobene und festgeklebte Ringe aus 2-mm-Aluminium halten das Horn in runder Form.

beitet so, dass er auf einer Frequenz zurücksendet, die in unserem Fall genau 30/7 der empfangenen Frequenz ist. Dadurch ist es dann möglich, die einzelnen empfangenen Wellenzüge zu zählen und daraus präzise Orts- und Geschwindigkeitsdaten abzuleiten.

Bei den von uns gewählten Frequenzen von 10,5 GHz und 2,45 GHz (daher das Verhältnis 30/7) wird pro 23 mm Bewegung des P5-A ein Wellenzug durchlaufen, das heißt ein Zählimpuls im Empfänger erzeugt. Damit lässt sich die geforderte Navigationsgenauigkeit von 10 m für P5-A erreichen.

Das Ganze funktioniert nur, wenn wir mit einer sehr konstanten Referenzfrequenz arbeiten und alle Frequenzen im Sender und Empfänger von dieser Referenz abgeleitet werden. Unsere Referenzfrequenz beträgt 10 MHz, und wir erzeugen sie mit einem Rubidium-87-Standard, einer Atomuhr, die auf etwa  $10^{-11}$  genau ist. Später soll dieser Standard noch an einen GPS-Empfänger angebunden werden, der die Frequenz dann auf  $10^{-12}$  konstant hält (bei 2,45 GHz wenige tausendstel Hertz). Der Sender ist so konstruiert, dass alle Frequenzen von dem 10-MHz-Standard abgeleitet werden. Zum Empfang verwenden wir einen AOR AR5000, siehe Bild 2, in den wir eine Ergänzungsschaltung ein-

**HF-System**

Für den 2,4-GHz-Sender kommt ein Magnetron mit Koaxialausgang zum Einsatz, welches über einen entsprechenden Übergang an den verwendeten Hohlleiter angeschlossen ist. Die mechanische Abstimmung des Magnetrons wird mit einem Servosystem, bestehend aus einem kleinen Gleichstrommotor und einem Dreigang-Potenzio meter für das Rückmeldesignal, realisiert. Der Tuner besteht aus einem Aluminiumstück, das innen an der Breitseite des Hohlleiters entlang gleitet. Es ist mit Teflon isoliert und hat eine isolierte mechanische Verbindung nach außen. Ein kleiner Teil (-50 dB) der HF-Leistung am Ausgang der Magnetron-Abstimmung wird an der Schmalseite des Hohlleiters zur weiteren Auswertung ausgekoppelt.



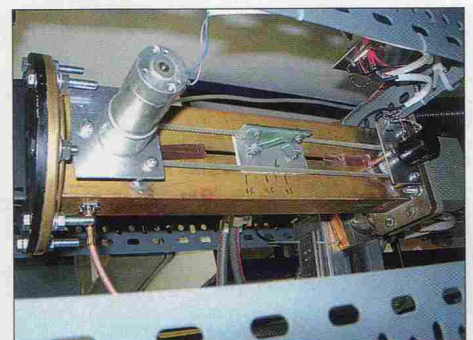
**Bild 5:** Übergang vom Magnetron mit koaxialem Anschluss zum Hohlwellenleiter

**Berechnung der Funkstrecke Erde-Venus-Erde auf 2,45 GHz**

Antennengewinn Bochum (Tx, $\eta = 52\%$ ):	+51,4 dBi <sup>1)</sup>
Streckendämpfung Erde-Venus:	-252,7 dBii <sup>2)</sup>
Empfangsgewinn der Venus-Fläche, $D_{\odot} = 12\,000\text{ km}$ :	+169,8 dBi <sup>3)</sup>
Albedo Venus = 13%:	-8,8 dB
Streckendämpfung Venus-Erde:	-252,7 dBii
Antennengewinn Bochum (Rx):	+51,4 dBi
Diverse kleinere Verluste:	-1,0 dB
<b>Dämpfung von Tx zu Rx:</b>	<b>-242,6 dB</b>
Senderleistung 5 kW:	+37,0 dBW
Dämpfung von Tx zu Rx:	-242,6 dB
Ankommendes Signal am Rx:	-205,6 dBW
Rauschleistung am Rx in 10 Hz:	-198,6 dBW <sup>4)</sup>
<b>S/N in 10 Hz Bandbreite:</b>	<b>-7,0 dB</b>

<sup>1)</sup>  $g/dBi = 10 + 20 \log(D/\lambda) + 10 \log \eta$   
<sup>2)</sup>  $a/dBii = 22 + 20 \log(d/\lambda)$   
<sup>3)</sup>  $G/dBi = 10 + 20 \log(D_{\odot}/\lambda)$   
<sup>4)</sup>  $P_r/dBw = 10 \log(kTB)$

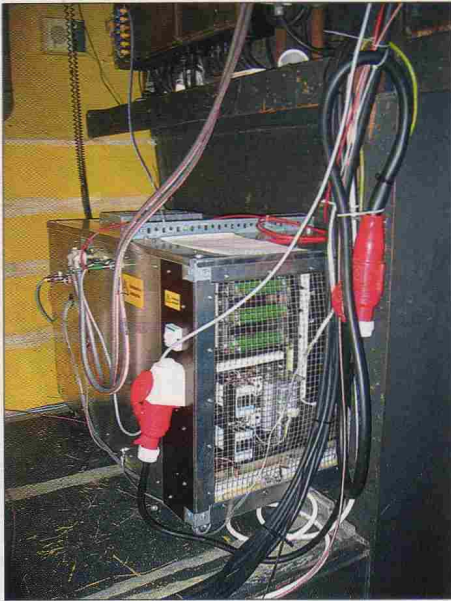
Die Ausgangsleistung gelangt über einen Zirkulator auf die Antenne, genauer gesagt an das Horn, siehe Bild 4. Am dritten Port des Zirkulators ist ein Lastwiderstand angeschlossen, der die rücklaufende Leistung von der Antenne aufnehmen soll. Der antennenseitige Anschluss ist direkt mit einem nach [11] berechneten Polarizer verbunden, der ein rechtsdrehend zirkular polarisiertes Signal an das Horn der Antenne liefert. Der andere Port des Polarizers liefert bei Empfang das linksdrehend zirkular polarisierte Signal für den Empfänger. Die Entkopplung zwischen den Polarisations Ebenen liegt im Bereich von 40 dB!



**Bild 6:** Ansicht des Gleitermechanismus; links der kleine Gleichstrommotor, rechts das Wendelpotenzio meter

Die mit dem Polarizer realisierte Entkopplung zwischen Sende- und Empfangszweig beträgt jedoch nur 26 dB. Daher liegt zusätzlich ein Koaxialrelais mit einem gutem Isolationswert von 60 dB und 0,2 dB Einfügedämpfung im Signalweg.

Die Anpassung (auf SWV  $s = 2$ ) und Abstimmung des Magnetrons wird über einen mechanischen Schieber realisiert. Sie erfolgt sehr langsam und gleicht Frequenzänderungen infolge der Magnetron-Erwärmung aus. Weiterhin greift diese Anpassung ein, wenn die Nominalfrequenz

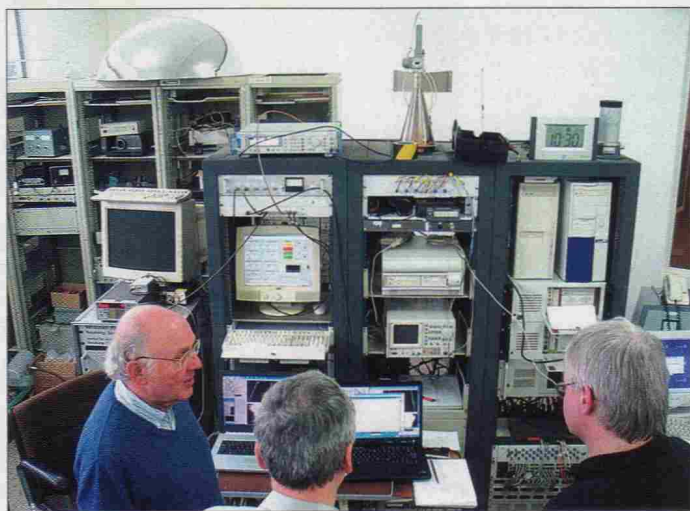


**Bild 7:** Die Stromversorgung mit Modulator passt gerade in eine Nische an der Rückwand des Fokusraums.

des Magnetrons außerhalb des Modulatorbereichs liegt. Im Prinzip kann der Gleiter das Magnetron über einen Bereich von ungefähr 10 MHz abstimmen.

### Der Magnetron-Modulator

Das Funktionsprinzip des Modulators wurde bereits in früheren Ausgaben des AMSAT-DL Journals beschrieben [9], [10]. Der Modulator basiert auf einem Paar 4CX1000-Röhren, die die Spannung für die Katode des Magnetrons über den positiven Teil des Hochspannungsnetzteils regeln. Über die Röhren ist ein Abstimmbereich von etwa 1 MHz realisierbar, um die Sendefrequenz zu stabilisieren und präzise zu halten.



**Bild 8:** Von diesem Platz im Kontrollraum aus wurde die Anlage während des EVE-Versuchs gesteuert; v. l. n. r.: Karl Meiner, DJ4ZC, Freddy de Guchteneire, ON6UG, Wolfgang Büscher, DL4YHF.

Das Magnetron wird über einen 6-V-Transformator mit 50 A geheizt (auf einem Potenzial von 7 kV gegen Masse!). Es nimmt im Empfangsbetrieb immer noch etwa 200 mA Katodenstrom auf und koppelt dann Magnetron-Rauschen über den Eingang des Polarizers in den Empfangszweig ein.

Die Hochspannung für das Magnetron wird daher beim Empfang über den Sequenzer und ein Vakuumrelais abgeschaltet. Der TX/RX-Sequenzer schaltet die verschiedenen Relais innerhalb einiger hundert Millisekunden.

### Kühlung

Das Magnetron und der Zirkulator sind wassergekühlt. Zum Abführen der Wärme findet ein Kühler aus einem VW-Polo einschließlich des Ausdehnungsgefäßes Verwendung. Das Prinzip ist wie im Auto: Wenn die Temperatur auf 40 °C ansteigt, läuft das Gebläse an.

Das Kühlsystem wurde von Konrad Müller, DG7FDQ, gebaut. Die Katode des Magnetrons ist luftgekühlt. Dazu ist ein hoher Staudruck erforderlich, der mit den vorhandenen oder beschaffbaren Lüftern nicht zu realisieren war. Aus diesem Grund kommt an dieser Stelle ein handelsüblicher Staubsauger (!) zum Einsatz. Die projektierte Laufzeit des Senders ist sicher kleiner als die Lebensdauer des Staubsaugers.

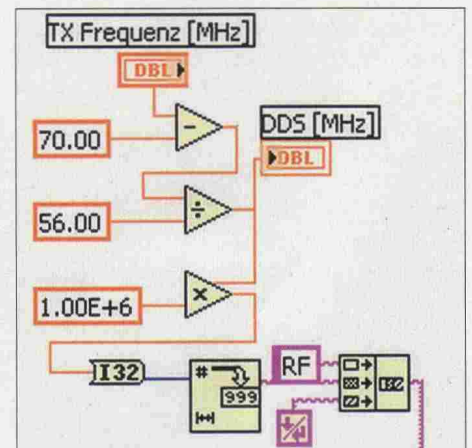
### Steuerung und Überwachung des 2,4-GHz-Senders

Als Steuergrößen sind zunächst die Hauptstromversorgung, die Zuschaltung der Hochspannung der Röhre, die Umschaltung des Exciters zwischen CW- und SSB-Betrieb und letztlich das PTT-Signal vorgesehen. Weiterhin soll die Sendefrequenz einstellbar sein, um für den zukünftigen P5-A-Kommandobetrieb innerhalb des Fangbereichs der PLL im Kommandoempfänger zu bleiben.

Die überwachten analogen Signale gehen aus Bild 10 hervor. Weitere digitale Signale geben Auskunft darüber, ob das Hochspannungsrelais geschaltet, das Magnetron synchronisiert, der Wasserdruck des Kühlsystems ausreichend und die Magnetron-Temperatur unterhalb einer Alarmschwelle sind.

### DDS-Oszillator

Die Variabilität der Sendefrequenz wird durch einen programmierbaren Frequenzgenerator nach dem DDS-Prinzip ermöglicht. Um das Ausgangssignal des DDS-Oszillators AD9913 phasenstarr an die vorhandene 10-MHz-Referenz der Bodenstation zu binden, wird diese Referenzfrequenz mit einer internen PLL auf 160 MHz multipliziert. Das benötigte Steuerwort für eine gewünschte Frequenz wird von einem



**Bild 9:** Ausschnitt des Programmteils, welcher aus der gewünschten Endfrequenz die Frequenz für den DDS-Oszillator errechnet, in eine 32-Bit-Integerzahl wandelt und in einen Textstring konvertiert. Schließlich wird der String mit dem Vorsatz RF und einem CR/LF komplettiert.

Mikroprozessor PIC16F886 von Microchip errechnet, welcher seinerseits über eine RS232-Schnittstelle mit 9600 Baud seine Befehle erhält. Das Ausgangssignal wird durch einen 50-MHz-Tiefpass gefiltert, um mögliche Reste der Referenzfrequenz zu unterdrücken, und durch einen nachfolgenden Breitbandverstärker auf -3 dBm verstärkt. Die exakte Endfrequenz errechnet sich zu:  $f_{tx}/\text{MHz} = 56 \cdot f_{dds}/\text{MHz} + 70$ .

### Monitorschaltung

Die Überwachung der Messgrößen des Senders wurde in einem separaten Schaltkreis realisiert. Aus Gründen der Verfügbarkeit kommt hier ebenfalls ein PIC 16F886 zum Einsatz. Er stellt acht Analogeingänge bereit, welche über einen internen Multiplexer mit einer Genauigkeit von 10 Bit digitalisiert, jedoch nur mittels eines 8-Bit-Wertes über die bereits erwähnte RS232-Schnittstelle übertragen werden. Ein zweiter Port beinhaltet je vier digitale Ein- und Ausgänge.

Die Steuerungssyntax ist relativ einfach gehalten; ein gesendetes *a* resultiert in einer Antwort von 8 Ziffern, welche einen Wert von 0 bis 255 haben und für die acht analogen Messwerte stehen. Ein gesendetes *d* veranlasst eine Antwort von acht Ziffern, die entweder 0 oder 1 sind und für

den aktuellen Status des digitalen Ports stehen. Die Steuerung der vier digitalen Pins erfolgt nach dem Nomen-Verb-System, wobei Nomen für *power*, *hv*, *tx* bzw. *cw* stehen kann und Verb entweder für *ein* oder *aus*. Beispielsweise führt *cw ein* zum Umschalten des Exciters vom SSB- in den CW-Mode und *cw aus* zum Umschalten in SSB.

**Verbindung zum Kontrollraum**

Die Kabellänge zwischen dem Fokusraum und dem Kontrollraum in Bochum beträgt ungefähr 50 m. Eine direkte RS232-Verbindung über solche Entfernungen ist relativ störanfällig und in direkter Umgebung eines Hochleistungssenders wohl nicht empfehlenswert. Zur Umgehung dieses Problems haben wir auf beiden Seiten Umsetzer von RS232 auf RS485 installiert, welche transparent für den RS232-Kommandoverkehr sind, jedoch differenzielle terminierte Signalübertragung verwenden und damit erheblich robuster als RS232 sind. Das NF-Signal für SSB-Betrieb wird differenziell über zwei dieser Leitungen übertragen.

**Benutzeroberfläche**

Obwohl eine direkte Steuerung durch ein beliebiges RS232-Terminalprogramm möglich ist und während der Entwicklungsphase ein unverzichtbares Hilfsmittel darstellte, war von Beginn an eine intuitiv bedienbare grafische Benutzeroberfläche vorgesehen. Die Wahl fiel auf eine Benutzeroberfläche basierend auf dem LabVIEW-Entwicklungstool von National Instruments [12]. Die Entwicklungsumgebung ist in der Version 6.1 kostenlos verfügbar, z. B. [13].

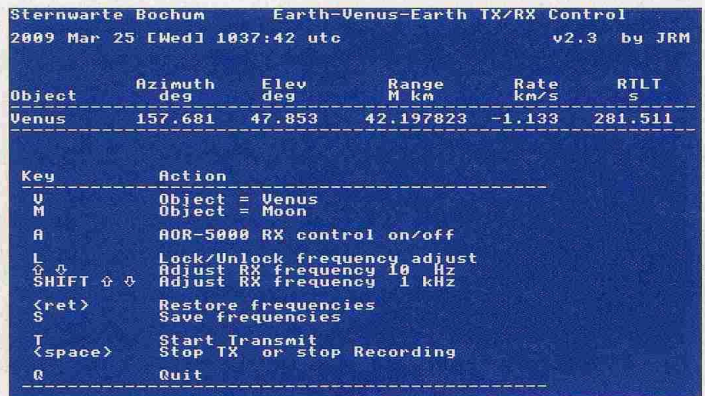
Im Gegensatz zu den meisten Programmiersprachen wird LabVIEW grafisch programmiert, d.h. Funktionen werden als Blöcke mit Ein- und Ausgängen dargestellt (Bild 9), welche miteinander verbunden werden. Funktionsblöcke reichen von einfachen Additionen bis hin zur RS232-

Schnittstelle, an der eingehende Zeichen direkt als Stringvariable abgegriffen werden können. Die verarbeiteten Daten können dann auf Ausgabeblöcke geleitet werden, welche z. B. Darstellungen von Zeigerinstrumenten oder Thermometern sein können. Alternativ ist auch die zeitliche Darstellung von Messgrößen in einem Diagramm möglich.

■ **Venus-Bahnverfolgung und Echo-Frequenzsteuerung**

Der 3-dB-Öffnungswinkel der Antenne beträgt im S-Band etwa 0,4°, sodass eine Ausrichtungsgenauigkeit von 0,04° erforderlich ist. Die Motorsteuerung der Antenne ist mehr als 10fach besser und die Berechnungen für Azimut und Elevation sind mehr als 100-mal genauer. Die Einzelheiten des Tracking-Systems und die Berechnungsmethoden sind in [14], [15] und [16] beschrieben.

**Bild 11:** Screenshot der Software der AOR5000-Empfängersteuerung; wenn ein T gedrückt wird, dann tastet eine Softwaresequenz den Sender für die Zeitdauer der RTLT. Danach wird die Aufzeichnung mit der gleichen Zeitdauer gestartet; die Betriebszustände werden in Rot oder Grün angezeigt.



Zur Berechnung der Position der Himmelskörper unseres Sonnensystems verwendeten wir die JPL-Planten- und Mond-ephemeriden DE405/LE405. Diese Daten bilden seit vielen Jahren die Grundlage der professionellen Astronomie und sind im Besonderen für den Mond und die inneren Planeten sehr genau. Die Bochum-Software liefert Daten für Azimut, Höhe, Entfernung und Geschwindigkeit, die identisch mit denen des JPL-Online-Dienstes [17] sind.

Das Echosignal ist durch die scheinbare Rotation der Venus frequenzmäßig breit. Diese setzt sich aus der natürlichen Bewegung der Venus in ihrer Umlaufbahn relativ zur Erde gesehen (etwa 0,6°/d) und der axialen Rotation der Venus (-1,5°/d) zusammen.

Ihre Vektorsumme ergibt eine scheinbare äquatoriale Geschwindigkeit von 1,1 m/s, was einer maximalen Dopplerverschiebung von ±17,5 Hz entspricht. Das mittlere Drittel davon beinhaltet einen Großteil der Energie, d.h. die Bandbreite beträgt etwa 10 Hz. Dies definiert die notwendige Bandbreite, sodass die Anforderung an die Frequenzstabilität zehnmal größer sein muss, sagen wir 1 Hz für sämtliche Signalquellen.

Der erste Schritt, um dies zu erreichen ist, alle Hardware-Oszillatoren aus einer gemeinsamen Referenzquelle (hier ein Rubidium-Standard) zu speisen. Wenn sich die

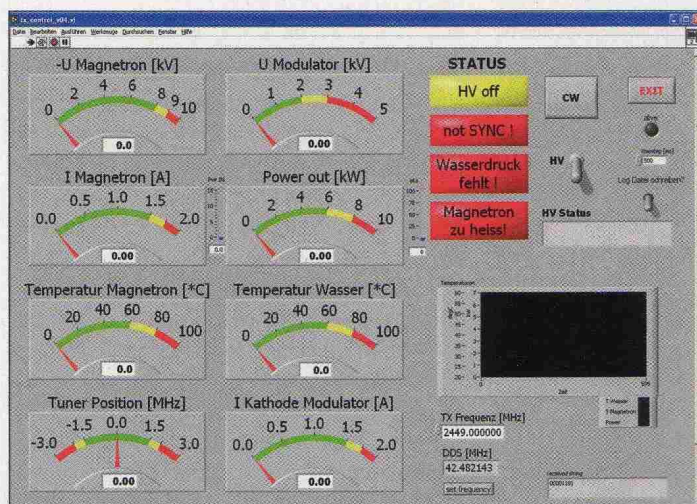
Sendefrequenz ändert, dann ändert sich die Empfangsfrequenz ebenso.

Der zweite Schritt ist, die Berechnungen Dopplerverschiebung *genau* zu machen. Der Computer verwendet hierfür die gleichen astronomischen Algorithmen, die auch der Antennensteuerung dienen und führt die Frequenz des Empfängers AOR 5000 über eine serielle RS232-Schnittstelle nach.

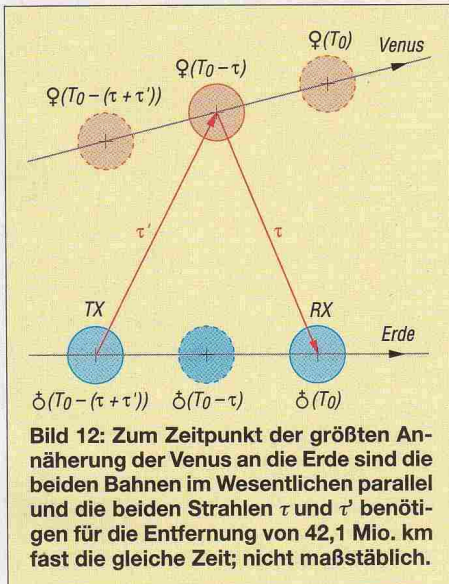
Die Frequenzauflösung des Empfängers liegt bei 1 Hz, was mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/s korrespondiert. Die tatsächliche Ungenauigkeit der Geschwindigkeit ist schwer aus den JPL-Ephemeriden abzuschätzen, aber sie wird sicher kleiner sein als 1 mm/s.

Die mittlere Doppler-Verschiebung des Echos ist auf die Uplink- und die Downlink-Bewegung des Signals zurückzuführen. Das Signal verlässt eine sich bewegende und drehende Erde und trifft auf eine sich bewegende Venus. Es verlässt die sich bewegende Venus und trifft auf eine sich bewegende und drehende Erde. Die Geometrie dieses Vorgangs ist in Bild 12 dargestellt.

Bei diesem EVE-Experiment wurden die Sendefrequenz konstant gehalten und der



**Bild 10:** Bedienoberfläche der grafischen Magnetron-Kontrollsoftware; es werden Anodenspannung, Anodenstrom, Anodenspannung Modulator, Anodenstrom Modulator, Wassertemperatur, Magnetrontemperatur, Servoposition und Ausgangsleistung überwacht.



Empfänger abgestimmt. Wir benötigen die Frequenz zum aktuellen Zeitpunkt ( $T_0$ ) für den Empfang eines Signals, welches 280 s früher gesendet wurde.

Die eigentliche Berechnung erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zu dem vorstehenden Absatz und setzt die Kenntnis der Position von der Erde zum Zeitpunkt  $T_0$ , von der Venus bei ( $T_0 - \tau$ ) und wieder von der Erde bei ( $T_0 - \tau - \tau'$ ) voraus. Der Strahl braucht  $\tau$  und  $\tau'$  und, obwohl ähnlich ( $\approx 140$  s), muss die Zeit separat und iterativ berechnet werden. Ihre Summe ist als die Gesamtsignallaufzeit (Round-Trip-Light-Time, *RTLT*) bekannt.

Die Geschwindigkeiten für Uplink und Downlink werden addiert und durch die Wellenlänge des Signals (0,12 m) geteilt, das ergibt die Dopplerverschiebung, die von der Sendefrequenz subtrahiert zur erwarteten Empfangsfrequenz führt. Dies Ergebnis wird auf 1 Hz gerundet und an den Empfänger übermittelt (Bild 11).

Die Software zur Frequenzsteuerung kann die Berechnungen sowohl für EVE als auch für EME ausführen. Der Mond ist wegen des gewaltigen Echos ( $\approx 50$  dB CNR in 100 Hz Bandbreite) ein nützliches Ziel, welches es ermöglicht, das gesamte RX- und TX- System von vorn bis hinten zu überprüfen. Am wichtigsten ist hierbei, dass das Signal mit dem Ohr empfangen und innerhalb der Bandbreite des Empfängers genau dort, wo man es haben will, platziert werden kann.

Zufällig hatten wir am 26. 3. 09 Neumond. Die Venus war der Erde am nächsten und der Mond stand, falls erforderlich, zur Verfügung, um das Echosignal zu überprüfen. Als die Tests begannen, wussten wir dadurch genau, wo sich auf der Spektraldarstellung des Empfangssystems das EVE-Echo aus dem Rauschhintergrund auftauchen würde. Und so geschah es. Zum ersten Mal, dann immer wieder ...

### ■ Venus-Echos sichtbar gemacht

Gemäß Bild 2 ist die letzte Komponente im analogen Empfangszweig ein SDR-IQ (software-definiertes Radio mit Quadraturausgang via USB-Schnittstelle) zum Umsetzen der 10,7-MHz-ZF in ein digitales Signal, welches mit dem PC in Echtzeit weiterverarbeitet wird. Dabei kommt eine modifizierte Analyse-Software von DL4YHF zum Einsatz. Auf Basis der obigen Vorüberlegungen haben wir die folgenden Parameter für die Analyse während der Messung gewählt:

- Abtastrate: 8138 S/s (die niedrigstmögliche Abtastrate des SDR-IQ);
- FFT-Größe: 1024 Punkte (d. h. schnelle Fourier-Transformation mit 1024 Abtastwerten pro Block).

Der vom SDR gelieferte rohe Datenstrom (mit 8138 S/s) wurde parallel zur Analyse auch auf der Festplatte gespeichert. Dadurch waren nach der Messung weitere Untersuchungen, z. B. mit optimierten FFT-Parametern, möglich. Die (komplexe) 1024-Punkt-FFT kann man sich wie eine Reihe schmalbandiger Empfänger im Abstand von je 8 Hz vorstellen (8138 Hz/1024), wobei jeder „Empfänger“ eine Bandbreite von 8 bis 12 Hz aufweist.

### SNR und SNNR (Verhältnis Signal plus Rauschen zu Rauschen)

Wie bereits erwähnt, wurde für das empfangene Signal ein SNR (signal-to-noise ratio, Signal-Rausch-Verhältnis) von  $-8$  dB in einer Empfängerbandbreite von 10 Hz geschätzt. Im Leistungsspektrum eines solchen Signals ist das SNR nicht direkt ablesbar, da das Nutzsinal trotz FFT-Gewinn noch weit unter dem Rauschpegel liegt. Die Leistung des schwachen Nutzsinal wird aber zur wesentlich stärkeren Rauschleistung addiert. Die Spektrumdarstellung kann daher statt des SNR bestenfalls das Verhältnis von Signal-plus-Rauschen zu Rauschen anzeigen – vorausgesetzt, das Spektrum ist nicht zu „wellig“. Das SNNR (signal-plus-noise to noise ratio) kann nach folgender Formel aus dem ebenfalls in Dezibel angegebenen SNR berechnet werden:

$$SNNR/\text{dB} = 10 \cdot \log(1 + 10^{(SNR/10 \text{ dB})})$$

Beim Venus-Experiment auf 2,4 GHz ergibt sich nach dieser Formel aus einem SNR von  $-8$  dB ein SNNR von 0,64 dB, d. h., Signal und Rauschen addieren sich auf der „richtigen Frequenz“ zu einem Wert, der theoretisch 0,64 dB über der Rauschleistung in den benachbarten FFT-Bins liegt.

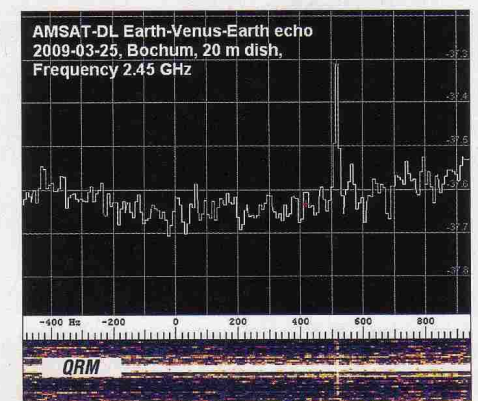
Bei weißem Rauschen beträgt die Standardabweichung  $\sigma$  im Leistungsspektrum

$$\sigma/\text{dB} = 4,34/\sqrt{n}$$

Darin ist  $\sqrt{n}$  die Quadratwurzel aus der Anzahl FFTs oder der Anzahl Integrationen. Mit  $n = 1$ , d. h. einer einzelnen FFT, schwanken die im Power-Spektrum angezeigten Werte also noch um 4,34 dB. Ein „Peak“ von 0,64 dB ist darin nicht erkennbar. Um diesen im Spektrum noch sicher zu erkennen, muss ausreichend lange integriert werden, bis die Standardabweichung  $\sigma$  im Leistungsspektrum auf weniger als ein Viertel des SNNR abgesunken ist. Nach obiger Formel ist dies ist nach

$$n = (4,34 \text{ dB}/0,64 \text{ dB})^2 = 731$$

auf integrierten Leistungsspektren der Fall. Bei 1024 Abtastwerten pro FFT und einer Abtastrate von 8138 Hz muss man das Signal mindestens 90 s empfangen, um die daraus berechneten Leistungsspektren aufaddieren zu können. Erst nach dieser Integrationszeit kann das Signal deutlich genug aus dem Rauschen hervortreten. Mit großer Erleichterung aller am Experiment beteiligten OMs tauchte am 25. 3. 09 das von der Venus reflektierte Signal trotz QRM (s. u.) nach weniger als 2 min aus dem Rauschen auf, Bild 13.



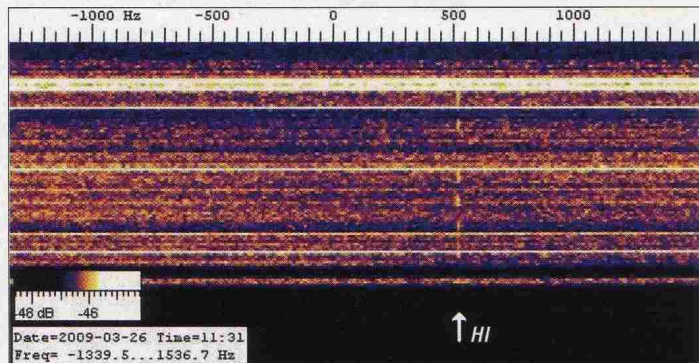
**Bild 13: Oben das über eine Empfangsperiode von 5 min gemittelte Leistungsspektrum, darunter ein Spektrogramm über 30 min Empfangszeit; jede (Pixel-)Zeile im Spektrogramm entspricht einer Minute Empfangszeit; gut erkennbar sind Zeiten mit unterschiedlich starken QRM.**

### ISM, QRM, WLAN & Co.

Beim ersten Versuch auf 2,4 GHz zeigte sich, dass im Empfänger trotz Antennenelevation statt Rauschen nur starke, impulsartige Störungen zu hören waren. Bei Analyse dieser Störungen im Oszillogramm waren diese als periodische Zacken von etwa 1 ms Dauer und 100 ms Periodendauer sichtbar – vermutlich das Bakensignal eines nahe gelegenen WLAN. Eine ad-hoc gestartete 2,4-GHz-Fuchsjagd blieb wegen starker Reflektionen und widersprüchlicher Peilrichtungen erfolglos.

Wegen der kurzen Störimpulse und der langen Periodendauer war es glücklicherweise möglich, den größten Teil der Störungen softwaremäßig zu unterdrücken:

Alle Signale, die im Zeitbereich über einem einstellbaren Schwellwert lagen, wurden rückwirkend (durch eine Verzögerungskette mit 0,5 ms Länge) ausgeblendet. Je nach Intensität und Kadenz der Störungen gingen dadurch zwar 2 % bis 10 % Nutzenergie verloren, mit optimierten Einstellungen konnte aber trotz WLAN-QRM in manchen 5-min-Perioden fast der theoretische SNNR-Wert erreicht werden. Nicht zu entfernen waren länger andauernde Störungen, z. B. WLANs mit höherem Datenaufkommen (Dauersender), Mikrowellenherde usw.



**Bild 14:**  
„Hi“ via Venus;  
die Botschaft in  
langsamer Telegrafie  
(QRSS) scrollt von  
oben nach unten  
über den Bildschirm.  
Diese Darstellungsart  
heißt auch Wasserfall-  
Diagramm.

Fotos und  
Screenshots:  
AMSAT-DL e. V. (13),  
IUZ (2)

Helle horizontale Streifen im Spektrogramm sind breitbandige, dauerhafte Störungen unterhalb des Noiseblanker-Schwellwertes. Dunkle Streifen stammen von stärkeren Störungen, die längere Zeit über dem Schwellwert des Störaustasters lagen. Glücklicherweise verschwanden die meisten dieser Störungen nach einigen Minuten.

### Ein Gruß in Telegrafie

Nach dem ersten erfolgreichen Experiment war am 26. 3. 09 noch Zeit für einen OSCAR-spezifischen Gruß über die Venus: In Erinnerung an OSCAR 1 wurde in Morse-Code einmal HI gesendet und empfangen – allerdings in einer sehr langsamen Telegrafie mit 5 min pro Punkt (= der ungefähren Signallaufzeit für Hin- und Rückweg), siehe Bild 14.

Die Nachricht bestand dabei aus 23 Perioden mit jeweils etwa 5 min Dauer, insgesamt fast 2 h. Während der Sendeperioden wurde das Spektrogramm angehalten; nur während der Empfangsperioden wurde eine Pixelzeile pro Minute an das Spektrogramm angefügt.

Pro Pixelzeile sind bereits viele FFTs aufaddiert, andernfalls (d. h., mit einer Pixelzeile pro FFT wie bei üblichen Wasserfall-Anzeigeprogrammen) wäre die Telegrafiebotschaft wegen des zu niedrigen SNR nicht erkennbar. Als Lohn der Mühe erschien bereits während des Experiments die zweifelsfrei erkennbare Nachricht auf dem Bildschirm des Analyse-PCs.

Wie sich bei abschließenden Tests zeigte, wäre eine Sendefrequenz unter 2400 MHz

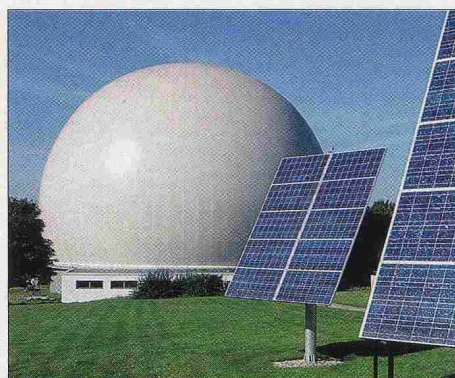
wegen des dort wesentlich niedrigeren Störpegels besser für zukünftige Projekte geeignet. Leider sind für diesen Frequenzbereich geeignete Magnetrons schwer zu finden (oder teuer) – Spenden an die AMSAT-DL [18] sind daher willkommen!

### ■ Ausblick

Unsere Bemühungen, die uns die Venus-Echos beschert haben, waren nur ein „Abfallprodukt“, die Bochumer Anlage als Kommandostation für P5-A einzurichten. Gleichwohl haben bereits Überlegungen begonnen, ob wir noch mehr Informatio-

nen aus dem Signal erhalten können (z. B. zur Oberflächenstruktur).

Nachdem es unserem großen Team gelang, Venus-Echos zu empfangen, fragen wir uns, warum dies nicht schon viel früher in Deutschland zum Beispiel mit professionellen Anlagen gemacht wurde. Wahrscheinlich haben die Experten nur den Riesenaufwand gesehen, den man in den USA getrieben hatte, und daraus geschlossen, „dass ein Land wie Deutschland sich das nicht leisten kann“.



**Bild 15: Radom (Radarkuppel) der Sternwarte Bochum/Institut für Umwelt- und Zukunftsforschung (IUZ) mit der darin verborgenen Parabolantenne**

Und damit sind wir wieder bei P5-A angelangt: Auch hier ist heute die gängige Vorstellung der Amtsträger der Raumfahrt, dass sich ein Land wie Deutschland eigenständige planetare Raumfahrt nicht leisten kann. Die AMSAT ist aber angetreten, um das Gegenteil zu beweisen, nur verweigert man uns bis jetzt jede Unterstützung, weil man ja weiß, „dass wir das nicht können“.

Wir hoffen, dass man vielleicht etwas aus unseren Venus-Echos lernt. Auf jeden Fall sind wir jetzt bereit, mit der Bochumer Anlage das P5-A-Raumfahrzeug zum Mars zu steuern.

In den frühen Tagen der Mikrowellentechnik, ab 1958, wurde die Gruppe, die sich mit den ersten EVE-Reflexionen von 440-MHz-RADAR-Signalen beschäftigte, *Carpetbaggers* (Abenteurer) genannt. Das waren Profis in der RADAR-Technik. Zur Anerkennung der hier geleisteten Arbeit sei jedem, der sich mit dem Thema beschäftigt, die Lektüre der Geschichte der Venus-Reflexionen [19] ans Herz gelegt!

Wenn wir in die Zukunft gehen wollen, müssen wir zurück in die Geschichte schauen, um den richtigen Weg zu finden!

Bearb: Dr. W. Hegewald, DL2RD

### Literatur

- [1] Meinzer, K., DJ4ZC: Erde – Venus – Erde, Empfang von Venus-Echos mit der Bochumer P5-A-Kommandostation. AMSAT-DL Journal 36 (2009) H. 2, S. 4–11
- [2] Vollhardt, A., DH2VA: Steuerung und Überwachung des 2,4-GHz-Senders. ebenda, S. 12–13
- [3] Hagn, H., DK8CI; Münich, M., DJ1CR: IUZ-Antenne: Messung der Systemrauschtemperatur. ebenda, S. 14–15
- [4] Büscher, W., DL4YHF: Venus-Echos sichtbar gemacht, QRM mit Software ausgeblendet. ebenda, S. 16–17
- [5] Miller, J., G3RUH: Technik für EVE, Venus-Bahnverfolgung und Frequenzsteuerung für Venus-Echos. ebenda, S. 18–19 (Übers.: Bilsing, A., DL2LUX)
- [6] de Guchteneire, F., ON6UG: Das HF-System, Abstimmung des Magnetrons für das EVE-Experiment. ebenda, S. 20–21 (Übers.: Pfeiffer, J., DJ9AL)
- [7] AMSAT-Deutschland e. V., Ernst-Giller Str. 20, 35039 Marburg; [www.amsat-dl.org](http://www.amsat-dl.org)
- [8] IUZ Sternwarte Bochum, Blankensteiner Str. 200a, 44797 Bochum; [www.sternwarte-bochum.de](http://www.sternwarte-bochum.de)
- [9] Straube, H.; Meinzer, K., DJ4ZC: 5-kW/2,45-GHz-Sender kurz vor der Vollendung. AMSAT-DL Journal 36 (2009) H. 1, S. 4–8
- [10] Meinzer, K., DJ4ZC: Die 3. Ausbaustufe der Bochumer Antenne: der 2,45-GHz-Sender. AMSAT-DL Journal 35 (2008) H. 1, S. 10–15
- [11] Chen, M.; Tsandoulas, G.: A Wide-band square-waveguide array polarizer. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 21 (1973) H. 3, S. 389–391
- [12] National Instruments: NI LabVIEW 2009. [www.ni.com/labview/d](http://www.ni.com/labview/d)
- [13] LabView 6.1 (kostenloser Download): [www.heise.de/software/download/labview/43883](http://www.heise.de/software/download/labview/43883)
- [14] Miller, J., G3RUH: Steuerungssoftware für die 20-m-Antenne der Sternwarte Bochum. AMSAT-DL Journal 31 (2004) H. 3, S. 18–21
- [15] Miller, J., G3RUH: Die astronomische Software für die 20-m-Antenne der Sternwarte Bochum. AMSAT-DL Journal 31 (2004) H. 4, S. 15–18
- [16] Miller, J., G3RUH: Control Software for the Bochum Radio Telescope. [www.amsat.org/amsat/articles/g3ruh/126.html](http://www.amsat.org/amsat/articles/g3ruh/126.html)
- [17] Jet Propulsion Laboratory: HORIZONS System. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>
- [18] AMSAT-DL: Go-Mars mit AMSAT-DLs P5-A-Mission. [www.ticket-to-mars.org](http://www.ticket-to-mars.org)
- [19] Buder, R.: The Invention That Changed the World. Little, Brown 1997, ISBN 978-0316907156