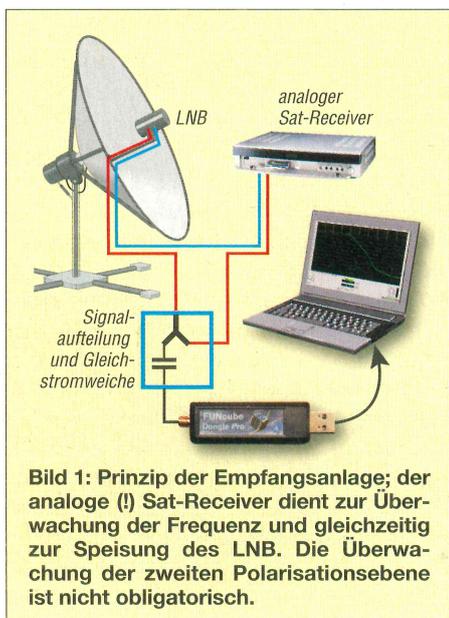


Radioastronomie mit dem FUNcube-Dongle

THOMAS FREINA – DG2NEU

Lässt sich die Sonnentemperatur mit einem alten Satellitenspiegel messen? Im Prinzip ja... Nachfolgend wird der Weg dazu beschrieben, wobei ein FUNcube-Dongle und die Freeware SpectraVue in Verbindung mit einem PC zum Einsatz kommen.

Die solare Radiostrahlung hat je nach Wellenlänge ihren Ursprung in unterschiedlichen Höhen über der für das menschliche Auge sichtbaren Sonnenoberfläche, der sogenannten Photosphäre. Der Aufbau der Sonnenatmosphäre geht aus Bild 2 hervor. Radiostrahlung mit Wellenlängen von einigen Zentimetern entspringt in Schichten der Chromosphäre knapp über der Photo-



sphäre und solche größerer Wellenlängen, etwa im Dezimeterbereich, weiter oben in der unteren Sonnenkorona.

Die Sonne ist mit einfachen Amateurmitteln über einen sehr großen Bereich des Radiospektrums beobachtbar, von den kurzen Zentimeterwellen bis hin zu langen Meterwellen.

■ 11-GHz-Empfangsversuche mit einem 1,8-m-Satellitenspiegel

Neben einem 3,7-m-Parabolspiegel steht mir ein kleinerer mit einem Durchmesser von 1,8 m zur Verfügung. Er diente ursprünglich als Kopfteil einer TV-Hausanlage. Die Montierung des Spiegels ist inzwischen so umgebaut, dass sowohl eine Drehung in der Horizontalen um 180° als auch eine Positionsänderung in der Vertikalen um 80° möglich ist. Die Bewegung erfolgt motorgetrieben über eine Fernsteuerung, die aus zwei der ursprünglich von Grundig

für die STR-300-Satellitenempfänger gebauten Steuergeräten besteht.

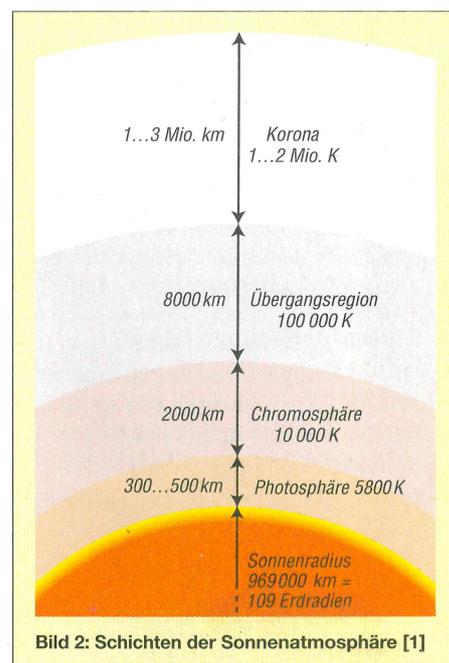
Der Parabolspiegel selbst ist auf einem kurzen Mast 1 m über dem Fundament montiert. Das erleichtert den Umbau der LNB-Einrichtung für unterschiedliche Experimente erheblich. Die Montierung ist so konstruiert, dass der Parabolspiegel von seiner Südposition aus horizontal jeweils um 90° nach Osten oder Westen gedreht werden kann.

Im Primärfokus befinden sich die zwei originalen TV-LNBs (engl.: *Low Noise Block*, rauscharmer Block-Umsetzer) für den Empfang von horizontal sowie vertikal polarisierten Funksignalen bei 11 GHz (10,85 GHz bis 11,7 GHz). Sie setzen diese Signale in den Bereich 900 MHz bis 1750 MHz um. Da die Anlage vor mehr als 15 Jahren angeschafft wurde, weisen die beiden LNBs noch ein relativ hohes Rauschmaß von 0,8 dB auf. Bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C entspricht das einer Empfängerrauschtemperatur von $T_{RX} \approx 60$ K (Grad Kelvin).

Heute sind im Fachhandel bereits TV-LNBs erhältlich, die ein Rauschmaß von 0,2 dB (Markenhersteller wie Kathrein-Werke KG geben allerdings höhere Werte an) aufweisen – das entspricht einer Empfängerrauschtemperatur von 14 K. Die Verwendung von solch empfindlichen LNBs verbessert die Systemeigenschaften etwas. Dadurch wäre sogar eine kleinere Satellitenschüssel (1 m Durchmesser) für derartige Versuche verwendbar.

Meine beiden LNBs sind gemäß Bild 1 mit dem analogen Satellitenempfänger STR-300 über zwei 75-Ω-Koaxialkabel verbunden. Damit werden die LNBs zugleich mit Betriebsspannung versorgt. Eines dieser beiden Kabel ist durch ein T-Stück unterbrochen, das drei Anschlüsse hat. Darin wird die HF-Spannung über einen kleinen Koppelkondensator für den im weiteren Signalweg liegenden FUNcube-Dongle (FCD, [2], [3]) abgezweigt. (Ein handelsüblicher Zweifachverteiler mit *einseitigem DC-Durchlass*, alias *1 × Power Pass*, tut es auch.)

Beim Bau dieser Weiche aus Bastelmaterial bzw. beim Kauf ist sehr genau darauf zu achten, dass dem FCD keine Gleichspan-



nung zugeführt wird; sie würde den FCD sofort beschädigen. Die andere Signalleitung vom zweiten LNB bleibt unverändert. Sie dient lediglich als Vergleichskanal für temperaturbedingte Signalschwankungen. Die Überwachung der zweiten Polarisationssebene ist jedoch kein Muss.

Ein Aufbau in der beschriebenen Art, d. h. mit Komponenten aus dem Elektromarkt, genügt zunächst vollkommen, um die Radiostrahlung der Sonne bei Frequenzen um 11 GHz nachweisen zu können. Wegen der oberen Bandbegrenzung kann der FCD nur den Frequenzbereich 900 MHz bis 1700 MHz nutzen. Für die Empfangsversuche muss nun ein freier Bereich gesucht werden, der nicht durch einen TV-Kanal belegt ist. In meinem Fall war der ZF-Bereich um 1010 MHz frei von terrestrischen Aussendungen, sodass das gesuchte Rauschsignal der Sonne dort ungestört empfangbar war.

Bei der Recherche nach Informationen zur Amateurradioastronomie im Allgemeinen und zum Nachweis der Radiostrahlung von der Sonne im Speziellen findet man im Internet etliche Beiträge. Viele dieser Dokumentationen beschäftigen sich mit dem Aufbau einer einfachen Empfangsanlage unter Zuhilfenahme von Komponenten aus der TV-Satellitentechnik.

Oft kommt für die Signalanzeige ein gewöhnlicher Sat-Finder als Messinstrument zum Einsatz. Die Ergebnisse sind mitunter beachtlich, haben jedoch nur eine geringe physikalische Aussagekraft. Sie sind nicht für Vergleiche mit Ergebnissen anderer zu gebrauchen. Aus diesem Grund habe ich mich dafür entschieden, den FCD zusammen mit der frei nutzbaren Software SpectraVue [4] für diesen Versuch einzusetzen.

■ **Daten der Empfangsanlage**

Um die Quantität und die Qualität der empfangenen Signale richtig einschätzen zu können, sind folgende Überlegungen anzustellen:

- Wie groß ist der Durchmesser (*D*) des verwendeten Parabolspiegels?
- Welchen Gewinn (*G*) hat das Reflektorsystem gegenüber einem isotropen Strahler?
- Welchen 3-dB-Öffnungswinkel (engl.: *Half-Power Beam Width*, HPBW) weist die Antenneneinrichtung auf?
- Welche Systemrauschtemperatur *T_{sys}* hat die Empfangsanlage?

Zunächst kennen wir nur *D* = 1,80 m sowie *F_{LNB}* = 0,8 dB.

■ **Antennengewinn als Faktor**

Im Folgenden beziehe ich mich auf die Formeln in nebenstehendem Kasten [5]... [8]. Wichtig ist, dass wir mit Daten wie Gewinn und Rauschfaktor als Zahlenwerten operieren müssen, also nicht in logarithmierter Form als Dezibel! Für den Gewinn über Kugelstrahler (*isotrop*) benötigen wir noch den Flächenwirkungsgrad η des Parabolspiegels, für den Literatur wie [6] $\eta = 0,55$ als „guten Mittelwert“ angibt. Mit $\lambda \approx 0,027$ m ergibt sich aus (1) $G_{Ant} = 24125$. Aufgrund ihrer Richtwirkung leuchtet die Parabolantenne nur noch einen kleinen Teil einer um sie herum gedachten Kugel aus. Der *Raumwinkel* dieser Richtwirkung kann näherungsweise gemäß (2) beschrieben werden und hat die Einheit Steradian (*sr*, Bogenmaß zum Quadrat); im Sinne von SI-Einheiten ist er dimensionslos.

$$\Omega_{Ant} = 0,000521 \text{ sr.}$$

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel und dem Antennengewinn. Je kleiner der Öffnungswinkel, desto größer ist der Gewinn. Andererseits verkleinert sich bei einer gegebenen Antennenfläche der Öffnungswinkel mit steigender Frequenz, der Gewinn steigt dabei ebenfalls. Jetzt ist leicht zu erkennen, warum eine Vergrößerung der Antennenfläche zu besseren Ergebnissen

führt. Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit steigen dabei an.

■ **Empfindlichkeit des Empfangssystems**

T_{sys} stellt einen entscheidenden Parameter, nämlich die Rauschtemperatur des Empfangssystems dar. Sie errechnet sich aus der Rauschtemperatur der Empfangshardware *T_{Empf}* und weiteren Rauschbeiträgen wie Verlust durch die Abdeckung des Feedhorns, atmosphärische Verluste, galaktisches Rauschen. [6] gibt dafür insgesamt *T_{Zus}* = 35 K an. Für die atmosphärischen Verluste werden in der Literatur Werte von 0,2 dB bei sehr guter Wetterlage in Richtung Zenit bis hin zu 1,5 dB bei bewölktem Himmel genannt (zur Orientierung: annähernd gilt 0,1 dB $\hat{=}$ 6,8 K).

Nun ergibt sich aus der Gleichung (3) *T_{Empf}* = 59,3 K, wobei eine Umgebungstemperatur *T₀* (hier 293 K oder 20 °C) zugrunde liegt. Dieser Gesamtrauschfaktor *T_{Empf}* für den LNB und die folgenden Komponenten setzt sich aus deren Einzelfaktoren zusammen, wobei die erste Komponente, der LNB, den Gesamtwert wegen seiner extrem hohen Durchgangsverstärkung maßgeblich bestimmt. Deshalb betrachte ich hier die Eigenschaften der nachfolgenden Komponenten wie Antennenkabel, Steckverbinder und FCD nicht. Die Summe nach Gleichung (4) führt letztlich auf *T_{sys}* = 93,3 K.

Mit diesen Voraussetzungen können wir nun erste Messungen durchführen.

■ **Messung des Öffnungswinkels**

Zur Bestimmung des 3-dB-Öffnungswinkels der Antenne wird am besten ein Sonnen transit genutzt. Das empfiehlt sich auch deshalb, weil dabei die Ausrichtung der Antenne durch den Schattenwurf leicht zu kontrollieren ist. Im Herbst und im Frühjahr zieht die Sonne ihre Bahn durch den Gürtel der geostationären Nachrichtensatelliten. Die starken Emissionen dieser Satelliten können durchaus mit dem Radiosignal der Sonne verwechselt werden, deshalb kontrolliere ich die Ausrichtung der Antenne bei jeder Messung so,

Formeln zur Berechnung

Isotroper Antennengewinn als Faktor:

$$G_{Ant} = \eta \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

Raumwinkel der Antenne:

$$\Omega_{Ant} = \frac{4 \cdot \pi}{G_{Ant}} \quad (2)$$

Rauschtemperatur des Empfängers:

$$T_{Empf} = T_0 \cdot (10^{F_{LNB}/10 \text{ dB}} - 1) \quad (3)$$

Systemrauschtemperatur

$$T_{Sys} = T_{Empf} + T_{Zus} \quad (4)$$

Äquivalente Antennentemperatur:

$$T_{Ant} = T_{Sys} \cdot (10^{\Delta I/10 \text{ dB}} - 1) \quad (5)$$

Temperatur des Empfangsobjektes:

$$T_{SUN} = \frac{T_{Ant} \cdot \Omega_{Ant}}{\Omega_{SUN}} \quad (6)$$

Antennentemperatur aus solarem Flux:

$$T_{Ant} = \frac{S \cdot G_{Ant} \cdot \lambda^2}{2 \cdot k \cdot 4 \cdot \pi} \quad (7)$$

dass der Schlagschatten des Antennen-Feeds exakt mit dem Mittelpunkt des Parabolspiegels zusammenfällt.

Beim langsamen Durchgang einer punktförmigen Radioquelle durch die Antennenkeule beschreibt die empfangene Strahlungsintensität eine glockenförmige Kurve innerhalb der verstrichenen Zeit. Die Aufzeichnung in SpektraVue wird genau dann gestartet, wenn sich die Sonne gerade im Maximum der gemessenen Intensität befindet. Die so gesammelten Daten geben den Intensitätsabfall ΔI der solaren Radiostrahlung wieder, während die Sonnenscheibe langsam aus der Blickrichtung der Antenne herauswandert. Bild 3 zeigt diesen Vorgang.

Vom Intensitätsmaximum bis zur Grundlinie benötigt der Vorgang etwa 11 min. Die halbe Intensität wird somit nach 5,5 min durchschritten. Die Sonne legt am Himmel pro Minute 0,25° zurück. In 5,5 min werden demnach 1,375° überstrichen. Aus der Beobachtung nur einer Flanke eines gesamten Transitereignisses muss die Verdoppelung des Wertes auf 2,75° für die tatsächliche Halbwertsbreite erfolgen. Dieser Wert stimmt recht gut mit dem rechnerisch aus den mechanischen Größen und der Arbeitsfrequenz hergeleiteten Wert von 2,3° überein. Der Hersteller gibt 2,5° für diesen Parabolspiegel an.

■ **Sonnentemperatur**

Im nächsten Schritt soll nun die Temperatur der Sonne bestimmt werden. Dazu entnimmt man als Erstes den Wert der maximalen Strahlungsintensität aus dem Diagramm der bereits erfolgten Messung. Er

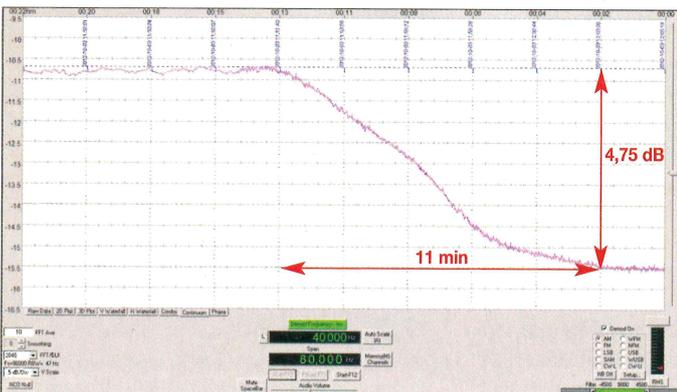


Bild 3: Messung mit SpektraVue (Farben zur besseren Darstellung im Druck geändert); der Pegel sinkt innerhalb von 11 min vom Maximalwert um 4,75 dB bis auf die Grundlinie ab.

Foto und Screenshot: DG2NEU

beträgt rund 4,75 dB über der Grundlinie. Dieser Wert stellt jedoch nur einen Teil der empfangenen Leistung dar, weil das T-Glied im Antennenkabel dafür sorgt, dass ungefähr nur die halbe Leistung zum FCD gelangt. Ein etwa gleichgroßer Teil wird dem Grundig STR-300 zugeführt. Deshalb wird die gemessene Intensität von 4,75 dB verdoppelt (+3 dB). Für die Fehlanpassung zwischen dem FCD mit 50 Ω Wellenwiderstand und dem TV-Antennensystem mit 75 Ω Wellenwiderstand kann man mit weiteren rund 2 dB Verlust rechnen. Die Summe ergibt $\Delta I = 9,75$ dB.

Über die Gleichung (5) erhalten wir so eine äquivalente Antennentemperatur in Höhe von $T_{\text{Ant}} = 795$ K. Diese ist nur ein fiktiver Wert, der an keinem Ort des mechanischen Antennengebildes real auftritt. Um aus dieser Antennentemperatur die Temperatur der Sonne ableiten zu können, muss ein Zusammenhang zwischen Antennentemperatur, dem Raumwinkel der benutzten Antenne und dem Raumwinkel der Sonne hergestellt werden. Er geht aus Gleichung (6) hervor.

Zur Lösung dieser Gleichung benötigen wir den Raumwinkel der Sonne. Er beträgt laut Literatur $\Omega_{\text{Sun}} = 0,0000679$ sr. Wer es nachvollziehen möchte: Die Sonnenscheibe hat einen scheinbaren Durchmesser von 32 Winkelminuten, also etwa $0,53^\circ$. Dieser ist in Bogenmaß umzurechnen. Anschließend führt die Kreisflächenformel $d^2 \cdot \pi/4$ auf den gewünschten Wert.

Mit Gleichung (6) und den ermittelten drei Werten Ω_{Ant} (2), T_{Sys} (4) und T_{Ant} (5) ergibt sich eine Temperatur für die Sonne von $T_{\text{Sun}} = 6104$ K. Dieser Temperaturwert entspricht einer Temperatur in der Chromosphäre der Sonne. Dort haben die mit dem Sat-System empfangenen Radiowellen ihren Ursprung. Diese Schicht in der Sonnenatmosphäre befindet sich oberhalb der Photosphäre und ist heißer als diese. Im sichtbaren Licht der Photosphäre hat die Sonne eine Temperatur von rund 5500 K.

Im Bereich der Sonnenatmosphäre zwischen der tiefer gelegenen Photosphäre und der weit darüber liegenden Sonnenkorona nimmt die Temperatur nach oben hin beständig zu. Deshalb lassen sich die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre recht gut bei unterschiedlichen Wellenlängen mit radioastronomischen Empfangssystemen untersuchen. Denn je kürzer die Radiowellenlänge ist, desto tiefer ist der Blick in die Sonnenatmosphäre.

■ Kontrollrechnung via Sonnenflux

Damit dieses Experiment nicht zu kompliziert wird, unterstelle ich, dass der Strahlungsfluss der Sonne, der in der Regel bei einer Wellenlänge von 10,7 cm bestimmt

wird, genau so groß ist wie der Strahlungsfluss bei der gemessenen Frequenz von 11 GHz (2,77 cm). In Wirklichkeit trifft das nicht vollkommen zu. Trotzdem passt das Messergebnis gut zu den realen Temperaturwerten.

Das lässt sich auf eine einfache Weise bestätigen. Für einen direkten Vergleich, des eigenen Ergebnisses wird der zur Messzeit aktuelle Wert der Strahlungsflussdichte *SFI* (Solar Flux Index) z. B. auf der Website www.spacewather.com nachgeschlagen. Die



Bild 4: Die Messungen erfolgten mit dem im Vordergrund gezeigten Parabolspiegel.

dortige Angabe erfolgt in *Solar Flux Units*. Ein *SFU* entspricht 10 000 Jy (Jansky) und 1 Jy entspricht 10^{-26} W/(m²·Hz). Mithilfe von Gleichung (7) wird wieder die äquivalente Antennentemperatur errechnet. Im beobachteten Fall bei einem SFI-Wert von 140 kommen wir auf $T_{\text{Ant}} = 710$ K.

Der Faktor 2 im Nenner von Gleichung (7) ist notwendig, weil nur eine Polarisationsrichtung (und somit nur die Hälfte) der normalerweise unpolarisierten Sonnenstrahlung empfangen wird. Dieses neue Ergebnis für T_{Ant} ergibt zusammen mit den bekannten Werten für Ω_{Ant} (2) und Ω_{Sun} über die Gleichung (6) eine Sonnentemperatur von 5446 K.

Die beiden Ergebnisse stimmen nicht exakt überein, weil einerseits nicht genau bekannt ist, wie sich die Empfangsleistung der Antenne über das T-Glied auf den FCD und den STR-300 aufteilt. Weiterhin ist die Größe der Fehlanpassung nicht vermessen worden, sie wurde nur geschätzt. Andererseits ist der im Internet veröffentlichte SFI-Wert über einen ganzen Tag gemittelt.

Damit ergeben sich sowohl bei der direkten Messung als auch bei der Berechnung Fehleranteile, die durchaus bis zu einigen Hundert Kelvin betragen können. Trotzdem stimmt die Größenordnung und das Ergebnis ist plausibel.

■ Fazit

Nach einigen Wochen intensiver Arbeit betrachte ich den FUNcube-Dongle als ein überraschend gut geeignetes Mittel für den geeigneten Amateur, um den Einstieg

in die praktische Radioastronomie zu finden. Der kleine SD-Empfänger bringt zwar einige Einschränkungen in Bezug auf die Bandbreite mit sich, lässt sich jedoch sehr einfach handhaben. Zusammen mit der Freeware SpektraVue wird daraus ein beachtliches Werkzeug, mit dem sich grundlegende Zusammenhänge aus der Radioastronomie nachvollziehen lassen.

Viele klassische Versuche, wie sie von den Pionieren der Radioastronomie um die Mitte des vorigen Jahrhunderts durchgeführt wurden [9], lassen sich damit nachleben. Durch den moderaten Preis des FCD und die kostenlosen Auswertetools steht damit obendrein ein Weg für Bildungseinrichtungen offen, um mit diversen pädagogischen Ansätzen den komplexen Themenbereich der Radioastronomie einem breiten Publikum zu vermitteln.

Inzwischen gibt es von Noxon einen DVB-Stick für den Anschluss an einen PC oder ein Notebook via USB. Auch dazu existiert Material im Internet. Diese Variante für einen preisgünstigen Radioastronomie-Empfänger ist etwas komplizierter zu installieren als der FCD. Sie hat aber den Vorteil einer größeren Bandbreite, was bei Anwendungen in der Radioastronomie der Empfindlichkeit zugutekommt.

Weitere Anstöße vermitteln u. a. der Beitrag [10], die Website [11] inklusive Live-Daten sowie meine u. g. eigene Website. Ein XLS-Arbeitsblatt, nutzbar mit Microsoft Excel, Apache OpenOffice usw., steht auf www.funkamateurl.de zum Herunterladen bereit.

www.dg2neu.de

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Hornsteiner, M., DG4MHM: Die veränderliche Sonne (1): der Aufbau der Sonne. FUNKAMATEUR 59 (2010) H. 6, S. 656–657
- [2] Bilsing, A., DL2LUX: Der FUNcube-Dongle – ein SDR-Empfänger besonderer Art. FUNKAMATEUR 61 (2012) H. 3, S. 241–243
- [3] www.funclubdongle.com
- [4] MoeTronix: SpectraVue. www.moetronix.com/spectravue.htm
- [5] Hagn, H., DK8CI: Empfangssystemparametermessungen mit Radiosternen. UKW-Berichte 34 (1994) H. 2, S. 80–89
- [6] Hagn, H., DK8CI: Größen einer Radioastronomieanlage. UKW-Berichte 40 (2000) H. 4, S. 237–238
- [7] Reithofer, S., DL6MH (†): Praxis der Mikrowellenantennen. Verlag UKW-Berichte, Baiersdorf 1987
- [8] Kark, K. W.: Antennen und Strahlungsfelder. 4., aktualis. und erw. Aufl., Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2011
- [9] Schiller, T., DC7GB: „Dämpfung“ der Funkstrecke (1). FUNKAMATEUR 61 (2012) H. 1, S. 64–65
- [10] Hansky, K., DL3HRT: Radioastronomie mit Funcube Dongle & Co. AATiS Praxisheft 23 (2013) S. 74–79
- [11] Germer, A.; Amorós, M. S.: Astronomie. <http://home.arcor.de/germer/html/astonomie.html>