

Nachweis des Supernovaüberrestes 'Taurus A' im Radiofrequenzbereich bei 435MHz mit Amateurmitteln

Originalausgabe: 1996/08/11

Korrekturen: 2001/05/12

Seit Ende 1989 betreiben einige astronomisch interessierte Funkamateure eine radioastronomische Empfangsanlage im Weiler Lüttschbach bei 8734 Ermenswil in der Nähe der Strecke Rapperswil-Rickenpass. Die GPS-Koordinaten für Besucher und den Koordinatenrechner lauten: N 47° 15' 3", E 8° 54' 35" mit der üblichen Unsicherheit für zivile Anwender. Hauptbestandteil der Anlage ist der weithin sichtbare Parabolspiegel mit 10m Durchmesser, ein Vollspiegel von mehren Tonnen Gewicht. Der Spiegel ist voll steuerbar wahlweise von Hand oder mit einem PC /1/. Der Spiegel ist auf den Überresten eines Baukrans montiert mit Schleifringen in der Basis für die dreiphasige Stromversorgung. Die Elevation wird mit einer Hydraulik angetrieben und mit einem optischen Winkelcodierer gemessen. Das Azimut wird über einen frequenzwandlergesteuerten Drehstommotor angetrieben und mit einem weiteren optischen Winkelcodierer gemessen. Die exakte Zeit wird dem PC via DCF77-Empfänger zugeführt. Der Steuer-PC ist ein 486-er mit vorgeschaltetem Azimutrechner, ein Einplatinen-Mikroprozessor SKC-85. Inzwischen sind verschiedene Programme verfügbar wie z.B. definierte Koordinaten ansteuern durch Eingabe von Elevation und Azimut. Permanente Verfolgung des Mondes oder der Sonne in Echtzeit. Graphische Anzeige der geostationären Satelliten und Darstellung der Istkoordinaten des Teleskops usw. In den vergangenen Jahren haben wir versucht immer schwächere Quellen nachzuweisen und an die Leistungsgrenzen des Teleskops zu gelangen. Der Betrieb hat angefangen mit Empfangsversuchen von geostationären Satelliten zwischen 1GHZ und 10GHz, gefolgt von EME-Versuchen (Funkverbindungen **Erde-Mond-Erde**) bei 1296MHz. Etwa 1992 begann die aktive Zeit der Hobbyradioastronomen, indem zuerst die Sonne auf verschiedenen Wellenlängen, Polarisationen, Modulationsarten und Bandbreiten registriert wurde. Dies ist mit einem 10m-Spiegel absolut unproblematisch, da die Sonne genügend thermisches Rauschsignal zur Verfügung stellt, selbst in ruhigen Zeiten ohne Sonnenflecktätigkeit. Die Sonne ist aber sehr gut geeignet das Antennendiagramm kennen zu lernen und damit den Gewinn zu bestimmen durch numerische Integration der Haupt- und Nebenkeulen. Wie wir mit Genugtuung feststellen konnten, erreichen wir reproduzierbar bei 432MHz über 30dB und bei 1296MHz über 39dB Antennengewinn. Nun konnten wir beginnen auch schwächere Quellen nachzuweisen, beginnend bei Cassiopeia A einem Supernovaüberrest mit etwa 11'000 FU (flux units) bei Rektaszension 23h 21m und Deklination +58° 33'. Cassiopeia A ist eine dankbare Quelle, ist

sie doch als zirkumpolare Quelle jederzeit meßbar, wenn nicht gerade die Sonne in der Nähe steht oder in eine Nebenkeule der Antenne strahlt. Ein Jahr später folgte die weit schwächere Quelle Cygnus A mit 8'100 FU bei Rektaszension 19h 58' und Deklination +40° 36'. Auch Cygnus ist gut nachweisbar sofern die Koordinatenberechnungen stimmen und die Quelle mindestens 20° über dem Horizont steht. Quellen unterhalb etwa 20° Elevation sind kaum oder nicht nachweisbar, weil die Strahlungstemperatur des Bodens mit 300 Kelvin viel zu stark ist. Zudem gibt es beliebig starke Störer aus der näheren Umgebung (Industrie, Telecom, Flugfunk und allgemein elektrische Apparate) auf Horizonthöhe. Nun ist es uns nach etlichen Versuchen endlich auch gelungen den schwachen Supernovaüberrest Taurus A im Sternbild Stier (Krebsnebel) bei Rektaszension 5h 31' und Deklination +21° 58' mit circa 1300 FU nachzuweisen. Dies kann durchaus als Erfolg verbucht werden, nach jahrelangen ergebnislosen Versuchen.

Das Empfangssystem ist sehr einfach aufgebaut, es besteht aus dem 10m-Spiegel in dessen Focus eine VHF-Yagiante (very high frequency) montiert ist. Unmittelbar nach der Antenne folgt ein GaAs-FET (Galliumarsenid-Feldeffekttransistor) Vorverstärker des Typs LNA-435 von der Firma SSB. Das so verstärkte Rauschsignal gelangt dann über einige Meter Koaxialkabel RG-213 in den drehbaren Messraum auf einen Kommunikationsempfänger AR3000. Dieser Empfänger ist auf 435,000MHz eingestellt in der Betriebsart WFM (wide FM mit 180KHz Bandbreite). Das 40MHz - Zwischenfrequenzsignal gelangt über ein einstellbares, dreidekadiges Dämpfungsglied auf einen multiplizierenden Demodulator bestehend aus einem S042P mit nachgeschaltetem Differenzverstärker und Integrator. Das etwa um den Faktor 100 verstärkte und während 200msec integrierte Signal gelangt nun einerseits auf ein Digitalmultimeter und andererseits auf eine im Steuer-PC eingebaute 12-Bit Analog-Digitalwandlerkarte PCL-712 von Advantech. Der Steuer-PC speichert die Antennenkoordinaten zusammen mit der Zeit und der gemessenen Signalspannung auf dem Harddisk ab. Die gespeicherten Datenfiles können anschließend auf einem anderen PC ausgewertet werden z.B. mit Math-CAD, Excel oder ähnlichen Programmen.

Durch Kalibration des in Abb. 2 gezeigten Signales mittels des einstellbaren Dämpfungsgliedes kann das Rauschmass F' direkt abgelesen werden durch weg- und wieder zuschalten von 0,1dB. Allerdings ist die Signaländerung von $\pm 0,1$ dB viel größer als die Signaländerung verursacht durch Taurus A. Da keine dB-Werte unter 0,1dB zur Verfügung stehen, wird das Rauschmass linear interpoliert. Das so ermittelte Rauschmass F' beträgt als Mittelwert von mehreren Durchgängen etwa 0,39dB. Dieses Rauschmass setzt sich zusammen einerseits aus dem abgelesenen Wert von etwa 0,04dB zuzüglich zwei Fehlanpassungen im ZF-Attenuator $75\Omega/50\Omega$ zu je 0,17dB. (Anmerkung: Das Dämpfungsglied wurde im Mai 2001 zu diesem Zweck mit einem modernen NWA nachträglich kalibriert, daraus ergibt sich der Wert 0,35dB) Nun läßt sich die Rauschzahl F bestimmen zu:

$$F = 10^{\frac{F'}{10dB}} = 10^{\frac{0,39dB}{10dB}} = 1,093 \quad (1)$$

Aus dieser graphisch/mathematisch bestimmten Rauschzahl kann nun die Rauschtemperatur der Antenne oder kürzer die Antennentemperatur T_a berechnet werden. Dabei gilt nach Kraus /2/

$$T_a = (F - 1) \cdot T_{ref} \quad (2)$$

Am Messtag, den 10. August 1996 um 14:00 Uhr MESZ betrug die Außentemperatur mindestens 29°C, d.h. die Umgebungstemperatur T_o beträgt somit 273Kelvin+29Kelvin=302Kelvin. Mangels geeigneter Kalibrationshardware im Frontend muss die Systemtemperatur geschätzt werden. Die Temperatur von Taurus A wird also bestimmt als Ueberhöhung gegenüber der Summe aus Systemtemperatur und Himmelstemperatur. Der Ansatz dafür sieht etwa folgendermassen aus:

Rauschender Komponent	Dämpfung	Summe
Symmetrierglied WISI	0.8dB (1dB max.)	0.8dB
Fehlanpassung 75Ω/50Ω	SWR=1.5 → 0.2dB	1.0dB
Kabel vom Feed zum LNA	0.4dB	1.4dB
NF(LNA435)	0.7dB	2.1dB

Die Gesamtattenuation die der Umgebungstemperatur ausgesetzt ist und die Rauschzahl bestimmt ist also etwa 2.1dB. Damit ergibt sich die Referenztemperatur T_{ref} zu:

$$T_{sys} = T_o \cdot (10^{0.21} - 1) = 188K \quad (2a)$$

Mit der Kenntnis der mittlerern Himmelstemperatur zum Zeitpunkt und am Ort der Messung können wir die Referenztemperatur bestimmen. Die Himmelstemperatur beträgt gemäss dem 408MHz all-Sky Continuum Survey des MPIFR etwa 30Kelvin.

$$T_{ref} = T_{sys} + T_{sky} = 188K + 30K = 218K \quad (2b)$$

Diese Referenztemperatur T_{ref} eingesetzt in (2) ergibt eine Antennentemperatur von circa 20 Kelvin (siehe Abb. 3), dies mit einer Unsicherheit von mindestens ± 3 Kelvin je nach Sonneneinstrahlung und anderen derzeit unbekanntem Grössen. Die mit der geringen Antennentemperatur verbundene Empfangsenergie kann berechnet werden durch Multiplikation mit der Boltzmannkonstante k .

$$W = k \cdot T_a = 1,38 \cdot 10^{-23} Ws / K \cdot 20K = 2,7 \cdot 10^{-22} Ws \quad (3)$$

Diese aus dem Kosmos empfangene unvorstellbar geringe Energie kann auf Grund der bekannten Bandbreite $B=180\text{KHz}$ des Empfangssystems in eine elektrische Leistung P umgerechnet werden, nämlich

$$P = W \cdot \Delta f = k \cdot T_a \cdot \Delta f = k \cdot T_a \cdot B = 5 \cdot 10^{-17} \text{ Watt} \quad (4)$$

Man versuche sich einmal diese Leistung vorzustellen, sie beträgt ausgeschrieben gerade nur: $P = 0,000'000'000'000'000'05$ Watt !

Um die Qualität der Empfangsanlage und damit der Messung selbst zu prüfen ist es notwendig die gemessene Antennentemperatur in eine für Vergleiche geeignete normierte Größe umzurechnen. Dazu verwendet man im Allgemeinen den Begriff Fluß (flux) S . Der Fluß S ist nicht direkt bestimmbar, denn man benötigt dazu die effektive Empfangsfläche A_e der Antenne, welche *nicht* identisch ist mit der geometrischen Fläche bzw. Apertur A_g . In den Anfangsjahren haben wir wie oben erwähnt mit derselben Anlage mehrere Sonnendurchgänge registriert und die dabei gespeicherten Antennendiagramme numerisch integriert. Diese numerischen Integrationen führen direkt zum Antennengewinn G in dB (dezibel) bzw. zum Richtfaktor D als Absolutzahl. Der hierbei berechnete Mittelwert für G beträgt 30,4dB bei 435MHz. Dieser Wert stimmt übrigens sehr gut überein mit Faustformeln für Parabolspiegel, welche aus der Literatur bekannt sind. Die Unsicherheit im Gewinn beträgt maximal $\pm 0,8\text{dB}$. Ebenso stellt man fest, dass die Halbwertsbreite der Keule mit 5° exakt mit formalen Schätzungen übereinstimmt. Der Richtfaktor bei 435MHz beträgt also umgerechnet 1096. Mit Kenntnis dieses Wertes läßt sich nun die effektive Apertur A_e berechnen zu

$$A_e = \frac{D \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} = \frac{1096 \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/sec} / 435 \text{ MHz})^2}{4 \cdot \pi} = 41,5 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Der Vergleich mit der geometrischen Apertur $A_g = \pi R^2 = 78,5 \text{ m}^2$ zeigt, dass der Wirkungsgrad η , also das Verhältnis von A_e zu A_g etwa $\eta = 0,53$ bzw. $\eta = 53\%$ beträgt. Dieser Wert ist nicht schlecht, wird doch die Hälfte der empfangenen Energie physikalisch bedingt wieder in den Raum zurückgestrahlt. Nun läßt sich endlich der Radiofluß S berechnen, wobei nach Kraus /2/ gilt

$$S = \frac{2 \cdot k \cdot T_a}{A_e} = \frac{k \cdot T_a \cdot 8 \cdot \pi}{D \cdot \lambda^2} = 1,33 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{m}^2} = 1330 \text{ Jansky} = 1330 \text{ FU} \quad (6)$$

In der zur Verfügung stehenden Literatur /3-4/ ist für Taurus A der Flusswert bei 400MHz angegeben zu 1230 Jansky mit einem Spektralindex von $n=0,27$. Damit läßt sich der bei 435MHz zu erwartende Flusswert näherungsweise berechnen.

$$S(\lambda) = S(\lambda_0) \cdot \left[\frac{\lambda}{m} \right]^n = 1230 \text{ Jansky} \cdot 0,69^{0,27} = 1113 \text{ Jansky} \quad (7)$$

Neuere, zuverlässigere Quellen des MPIFR /6/ ergeben für Taurus A hingegen einen höheren Flusswert von 1337FU gemäss folgender zugeschnittener Grössengleichung:

$$\log(S[\text{Jy}]) = a + b \cdot \log \nu[\text{MHz}] + c \cdot \log^2 \nu[\text{MHz}]$$

Für Taurus A gilt hierbei: $a=3.915 \pm 0.031$ und $b=-0.299 \pm 0.009$ und $c=0$

Ein doch überraschendes Ergebnis, stimmt es doch bis auf weniger als 1% mit dem gemessenen Wert von 1330 Jansky (6) überein. Es überrascht umso mehr, wenn man weiß wieviel Meßfehler, unbekannte Verluste und Fehlanpassungen das Leben erschweren können. Nun, das nächste Ziel ist bereits gefaßt und erste Versuche sind bereits gelaufen. Es geht darum zu versuchen die nächst schwächere Quelle Virgo A, eine ferne Galaxie bei Rektaszension 12h 28' und Deklination +12° 40' mit 970 FU zu registrieren. Falls dies positiv verläuft, können wir daran denken uns mit den interessanten aber extrem schwachen Pulsaren auseinanderzusetzen.



Abbildung #1:

Autor mit Sohn bei der Montage des Feeds und des Vorverstärkers am 10m-Parabolspiegel im Frühjahr 1996. Der Focus befindet sich circa 5m über Grund und ist daher nur mit einer Leiter erreichbar.



Assistent Stefan am Empfangssystem (Radiometer) im Shack von "Ricken Süd" beim registrieren von Taurus A.

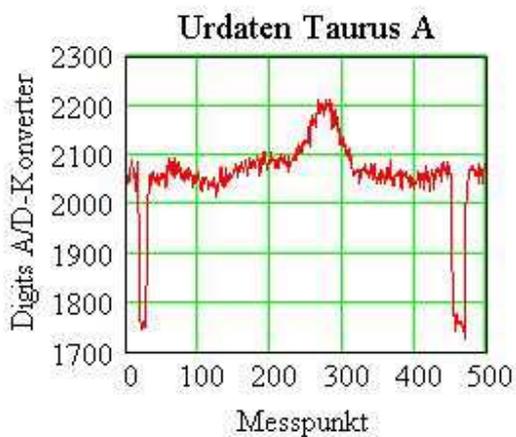


Abbildung #2:

Urdaten der Messung vom 10. August 1996 um 14:00 MESZ. Eingebledet zu Beginn und am Schluß die Zusatzdämpfung von 0,1dB in der 40MHz Zwischenfrequenzstufe. Es hat sich nachträglich gezeigt, dass auf Grund von Fehlanpassungen und schlechten elektrischen Kontakten die Dämpfungsschritte eben nicht 0,1dB sondern 0,39 dB betragen!

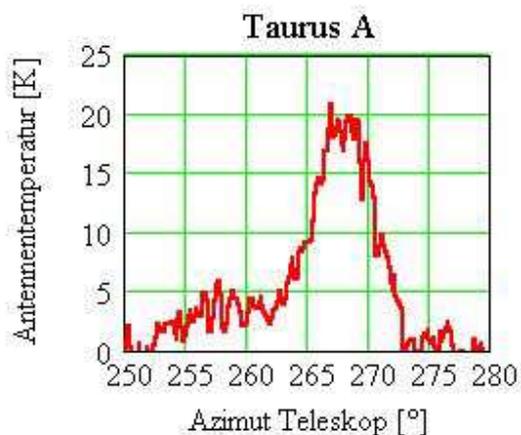


Abbildung #3:

Median-gefiltertes und kalibriertes Antennensignal in Kelvin äquivalenter Antennenrauschtemperatur über dem Azimut des Radioteleskops zum Zeitpunkt der Messung

Literaturnachweis:

/1/ ORION 268, Juni 1995, Seite 109, Christian Monstein, Amateur-Radioastronomie, Sonne-Mond-Korrelations-Interferometer zur Messung der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum.

/2/ John D. Kraus, Ph. D., Radio Astronomy, McGraw-Hill Book Company, New York 1966, ISBN=07-035392-1

/3/ G. W. Swenson, Jr., An Amateur Radio Telescope, Pachart Publishing House, Tucson 1980
ISBN=0-912918-06-3

/4/ Dave Heisermann, Radio Astronomy for the Amateur, Tab Books USA 1975,
ISBN=0-8306-4714-7

/5/ A 408 MHz All-Sky Continuum Survey. II. The Atlas of Contour Maps, C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel and W. E. Wilson. MPIFR Bonn 1981.

/6/ The Absolute Spectrum of Cas A; An Accurate Flux Density Scale and a Set of Secondary Calibrators. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth and A. Witzel. Astronomy and Astrophysics 61,99-106 (1977)

Ansprechadressen für Besucher und Spender:

1) Direktion: Léon Kälin, Lütschbachstrasse 10, 8734 Ermenswil, TF: 055 282 3443

2) Softwareaspekte: Dr. P. Aubry, HB9XM, Oberhalden, 8561 Ottoberg, TF: 071 620 0517, e-mail: paubry@weinfeld.ch

3) Elektronik, Auswertungen und Öffentlichkeitsarbeiten: Christian Monstein, HB9SCT, Wiesenstrasse 13, 8807 Freienbach, <http://www.monstein.de>

4) Kritiker und Berater: Klaus Steger, DC1GS, Hornisgrindestrasse 16, D-77815 Bühl-Balzhofen.

Kommentare zur Korrektur vom 12.05.2001 (Aufarbeitung von Kritiken)

1. Die angezeigten 0,1dB sind auf Grund von Nachmessungen mit dem NWA nicht 0,1dB sondern 0,39dB, dies auf Grund von schlechten elektrischen Kontakten und Fehlanpassungen. (Gl. 1)
2. Die relevante Referenztemperatur Tref ist NICHT die Umgebungstemperatur $T_0=302\text{K}$, sondern die Systemtemperatur $T_{\text{sys}}=188\text{K}$ plus Skytemperatur $T_{\text{sk}}=30\text{K}$ (Gl. 2)
3. In Gleichung (6) wurde fatalerweise der Faktor 2 unterschlagen

Insgesamt haben sich alle Mess- und Rechenfehler so kompensiert, dass das Endergebnis trotzdem gestimmt hat...