

Amateur-Radioastronomie

Sonne-Mond-Korrelations-Interferometer zur Messung der absoluten Geschwindigkeit des Sonnensystems

Es soll mit Amateurmitteln versucht werden, die direkte Sonnenradiostrahlung mit der vom Mond reflektierten Strahlung zu korrelieren mit dem Ziel die sog. 'one way velocity' des Lichtes bzw. der Radiostrahlung zu messen. Erste Messung ähnlicher Art im optischen Bereich hat Olaf Roemer 1675/76 durchgeführt bei Beobachtungen der verzögerten Bedeckung des Jupitermondes Ganymed durch den Jupiterschatten. Damals erhielt er einen nach heutigem Maßstab zu tiefen Wert für c von $2,4 \cdot 10^8 \text{m/sec}$. FIZEAU (1819-1896) mit seiner Zahnradmethode und später FOUCAULT 1850 mit seiner Drehspiegelmethode verwendeten Methoden, bei denen die 'two way velocity' gemessen wurden. Auch alle Radarmessungen an Sonne, Mond und anderen Planeten oder im Labor messen die Zweiweggeschwindigkeit, d.h. den Mittelwert aus Geschwindigkeit vom Sender zum Reflektor und zurück vom Reflektor zum Empfänger. Heute werden, wenn überhaupt, vorwiegend Messungen an Hohlleitern vorgenommen, wobei stehende Wellen im Mikrowellenbereich analysiert werden. Nachdem im Oktober 1983 eine internationale Kommission den Zahlenwert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu $c=2,99792458 \cdot 10^8 \text{m/sec}$ festgelegt hat, scheinen Messungen sinnlos. Auch wenn es gemäß ART (Allgemeine Relativitätstheorie) nur *eine* Lichtgeschwindigkeit gibt und diese per Dekret konstant ist, gibt es meines Erachtens plausible Gründe diese regelmäßig nachzuprüfen. Hier möchte ich eine Methode vorführen diese Einweggeschwindigkeit mit Amateurmitteln, d.h. mit geringem Aufwand und demzufolge geringer Genauigkeit zu messen.

1. Abschätzung des Radiofluxes vom Mond

In der mir zur Verfügung stehenden Literatur gibt es sehr wenig zuverlässige Angaben zur Intensität der Radiostrahlung vom Mond. Nach Kristen Rolfs Seite 170 /2/ beträgt der Radioflux des Mondes bei der Wellenlänge $\lambda=70\text{cm}$ etwa 50 Jansky. Hierbei gilt: 1 Jansky = $1\text{Jy} = 10^{-23}\text{W/m}^2\text{Hz}$. Die mir zur Verfügung stehende voll steuerbare Parabolantenne mit einem Durchmesser von $D=10\text{m}$ bei Ermenswil am Rickenpass /3/ hat näherungsweise folgenden theoretischen Gewinn G bei einer Empfangsfrequenz $f = 435\text{MHz}$

$$G = 17.7\text{dB} + 20\text{dB} \cdot (\log(F / \text{GHz}) + \log(D / \text{m})) = 30.37\text{dB} = 1089 \quad (1)$$

Diese Formel wurde in den letzten Jahren anhand verschiedener Messungen am Teleskop bei 435MHz und 1296MHz bestätigt mit Durchläufen von Cygnus A /8/, Cassiopeia A und der Sonne. Der experimentelle Fehler beträgt maximal $\pm 0,5\text{dB}$. Die Antenne muß für das folgende Experiment dem beleuchteten Teils des Mondes möglichst exakt nachgeführt werden (Fehler kleiner als 2°).

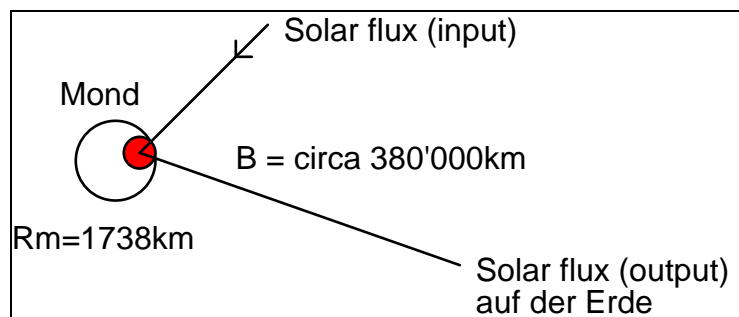
Mit obigen Parametern und der Boltzmann-Konstante k kann die zu erwartende Antennentemperatur $T_a(\text{Mond})$ ermittelt werden.

$$Ta_{Mond} = \frac{S \cdot Ae}{2 \cdot k}, \text{ wobei } Ae = \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} = \frac{G}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{c}{f} \right]^2 \quad (2)$$

$$Ta_{Mond} \geq \frac{50Jy \cdot 1089}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} J / K \cdot 4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot 10^8 m / s}{435MHz} \right]^2 = 0,75 Kelvin$$

Ein zweiter, möglicherweise etwas optimistischer Ansatz besteht darin, den Mond nach Meinke-Gundlach /4/ Seite 621 als passives Relais zu betrachten und auszurechnen, wie groß der zu erwartende reflektierte Anteil des Sonnenflusses auf der Erde sein könnte.

Bild #2: Mond als Reflektor:



Die reflektierende Fläche A_r auf dem Mond hängt ab vom Mondradius $R_m = 1738 \text{ km}$ und von der Wellenlänge $\lambda = c/f$. Die durchschnittliche Höhe der Kugelkappe (Oberfläche ist gebirgig) darf nach Meinke-Gundlach /4/ nicht höher sein als $h = 1/32\lambda$, damit der Reflektor wirksam ist und die Signal-Phase nicht zu stark verrauscht wird.

$$A_r = 2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot \frac{c/f}{32} = 2 \cdot \pi \cdot 1738 \text{ km} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{32 \cdot 435 \text{ Mhz}} = 2,35 \cdot 10^5 m^2 \quad (3)$$

Damit kann die Zusatzdämpfung Mond-Erde a_m berechnet werden zu

$$a_m = \ln \left[\frac{D \cdot \lambda}{A_r} \right] = \ln \left[\frac{380000 \text{ km} \cdot 3 \cdot 10^8 m/s}{2,35 \cdot 10^5 m^2 \cdot 435 \text{ MHz}} \right] = 1115 \text{ fach} = 7 \text{ Np} = 30,5 \text{ dB} \quad (4)$$

Damit beträgt die zu erwartende Antennentemperatur am Spiegel im "Ricken Süd" bei einem solaren Radioflux $S_s > 33 \text{ ISFU}$ (International solar flux units, $1 \text{ ISFU} = 10^{-22} \text{ W/m}^2 \text{ Hz} = 10^4 \text{ Jansky}$) wenigstens

$$Ta' = \frac{S_s \cdot G \cdot \lambda^2}{2 \cdot k \cdot a_m \cdot 4 \cdot \pi} = \frac{33 \text{ ISFU} \cdot 1089}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} J / K \cdot 1115 \cdot 4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot 10^8 m/s}{435 \text{ MHz}} \right]^2 = 4,4 \text{ Kelvin} \quad (5)$$

Wenn wir nun aber berücksichtigen, daß mindestens die Hälfte des Fluxes verloren geht, indem bei der Reflexion am Mond eine Polarisationsrichtung unterdrückt wird, so reduziert sich diese Antennentemperatur zusätzlich um $p = 50\%$

$$T_a = T_a' \cdot (1 - p) = 4,4 \text{ Kelvin} \cdot 0,5 = 2,2 \text{ Kelvin} \quad (6)$$

Die wahrscheinlichste, zu erwartende Antennentemperatur des Mondes liegt irgendwo dazwischen, d.h. $0,75 \text{ Kelvin} < T_m < 2,2 \text{ Kelvin}$. Es ist klar, daß sich diese Temperatur stark ändern (verschlechtern) kann, wenn sich der Mondabstand vergrößert oder wenn die beleuchtete Fläche kleiner wird. Abweichungen der als optimal angenommenen Antennenparameter (γ =Verlustfaktor im Hochfrequenzteil, β_s =Streifaktor der Antenne) vom Idealfall reduzieren ebenfalls die zu erwartende Temperatur. Der Vorverstärker in der Parabolantenne muß eine sehr geringe Rauschtemperatur aufweisen, damit das Mondsignal registriert werden kann. Der Vorverstärker soll unmittelbar am Empfangsdipol angeschlossen werden ohne Zwischenelemente wie Richtkoppler oder Relais. Als Vorverstärker eignet sich z.B. der LN4-435 EME von SSB-Elektronik.

2. Abschätzung des direkten Radiofluxes von der Sonne

Die direkte Sonnenstrahlung wird mit einer Mehrelement YAGI-Antenne empfangen, die neben dem Spiegel steht und fix (manuell) auf die Sonne ausgerichtet wird. Als Empfangsgewinn kann mit etwa 13dB_d gerechnet werden. Die zu erwartende Excess-Antennentemperatur beträgt dann gemäß Gleichung (2) etwa

$$T_{a_{\text{Sonne}}} \geq \frac{33 \text{ ISFU} \cdot 10^{1,3}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{435 \text{ MHz}} \right]^2 = 90 \text{ Kelvin} \quad (7)$$

Damit beide Signale (Sonne direkt und Mondreflexion) etwa gleich stark werden, muß das Mondsignal etwa 16dB mehr angehoben oder das Sonnensignal 16dB weniger verstärkt werden.

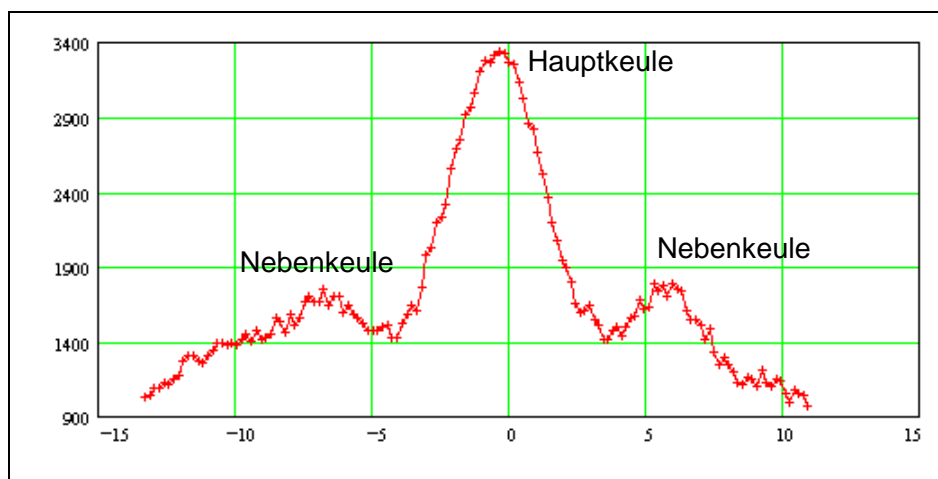
3. Korrelations-Interferometer

Alle Überlegungen und Berechnungen gehen davon aus, daß mit dem Amateur-Radio-Interferometer monochromatische Strahlung zweier Punktquellen empfangen wird. Dies ist in der Realität nicht der Fall, weil die Sonne erstens breitbandig rauscht und zweitens eine endliche Strahlungsfläche aufweist. Hingegen ist in den Antennenzuleitungen je ein selektiver GaAs-FET-Vorverstärker (Gallium-Arsenid Feld-Effekt-Transistor) mit geringer Bandbreite und geringer Rauschtemperatur vorgesehen um einerseits terrestrische Störsignale zu unterdrücken und andererseits ein definiertes Band aus dem Radiospektrum zu verstärken. Somit kann näherungsweise davon ausgegangen werden, daß monochromatische Radiostrahlung empfangen wird mit der Wellenlänge $\lambda = c/f = 300000 \text{ km/sec} / 435 \text{ MHz} = 69 \text{ cm}$. Weil die Sonne genügend weit entfernt ist und das Winkelauflösungsvermögen relativ schlecht ist, kann die Sonne als Punktquelle betrachtet werden. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Strahlen die zur Erde und die Strahlen welche zum Mond gelangen als parallel angesehen werden dürfen. Ich habe mich vorerst für ein Kreuzkorrelationsinterferometer entschieden, weil damit die Antennensignale auf dem direktesten Weg zum Detektor gelangen. Es würden weder Power-Combiner, Hybrids, Relais noch DICKE-Schalter benötigt. Die Empfindlichkeit des Korrelationsinterferometers wäre bedeutend besser als beim 'adding' Interferometer oder als beim 'phase switched' Interferometer. Nur wenn beide Antennensignale korreliert sind, d.h. wenn das vom Mond reflektierte Signal tatsächlich von der Sonne

stammt und nicht rein thermisch gespeicherte Sonnenenergie im Mondboden ist, ergibt sich ein Ausgangssignal, andernfalls ist der Ausgang null. Für die Auswertungen kann entweder die Fringe Frequenz direkt gemessen, oder durch Autokorrelation (ACF) die Laufzeit bestimmt werden. Die Registrierung des empfangenen Signals muß mit DCF77-Genauigkeit (Atomuhr) erfaßt und gespeichert werden zu verschiedenen noch zu bestimmenden Zeiten innerhalb des Jahres 1994. Sonne und Mond sollten möglichst weit auseinander stehen, damit die Sonne nicht direkt in die Mondantenne einstrahlen kann. Andererseits müssen beide Quellen genügend hoch über dem Horizont stehen, damit die terrestrischen Störungen nicht zu stark des Ergebnis beeinflussen können. Bereits gemessene Quellen-Durchläufe (s. Bild #3) des Parabolspiegels im 70cm-Band zeigen, daß die Nebenkeulen recht stark in Erscheinung treten. Gerade aus diesem unerwünschten Grund (Einstrahlung der Sonne in die Nebenkeulen des Hauptspiegels) entsteht ungewollt ein 'adding'-Interferometer. Aus obigen Gegebenheiten habe ich mich deshalb explizit für das 'adding'-Interferometer (Ryle-Typ) entschieden. Dafür sind auch bereits alle Hochfrequenzkomponenten vorhanden (Antennen, Vorverstärker, Power-Combiner, Empfänger, Detektor und Integrator). Die aufzuwendenden Kosten halten sich so in überschaubaren Grenzen. Zudem ist festzuhalten, daß die Berechnungen im Zusammenhang mit dem 'adding'-Interferometer "einfacher" sind als mit dem Korrelationsinterferometer, was für Amateure allein schon ein ausreichender Grund ist.

Bild #3 Kalibrationsquelle:

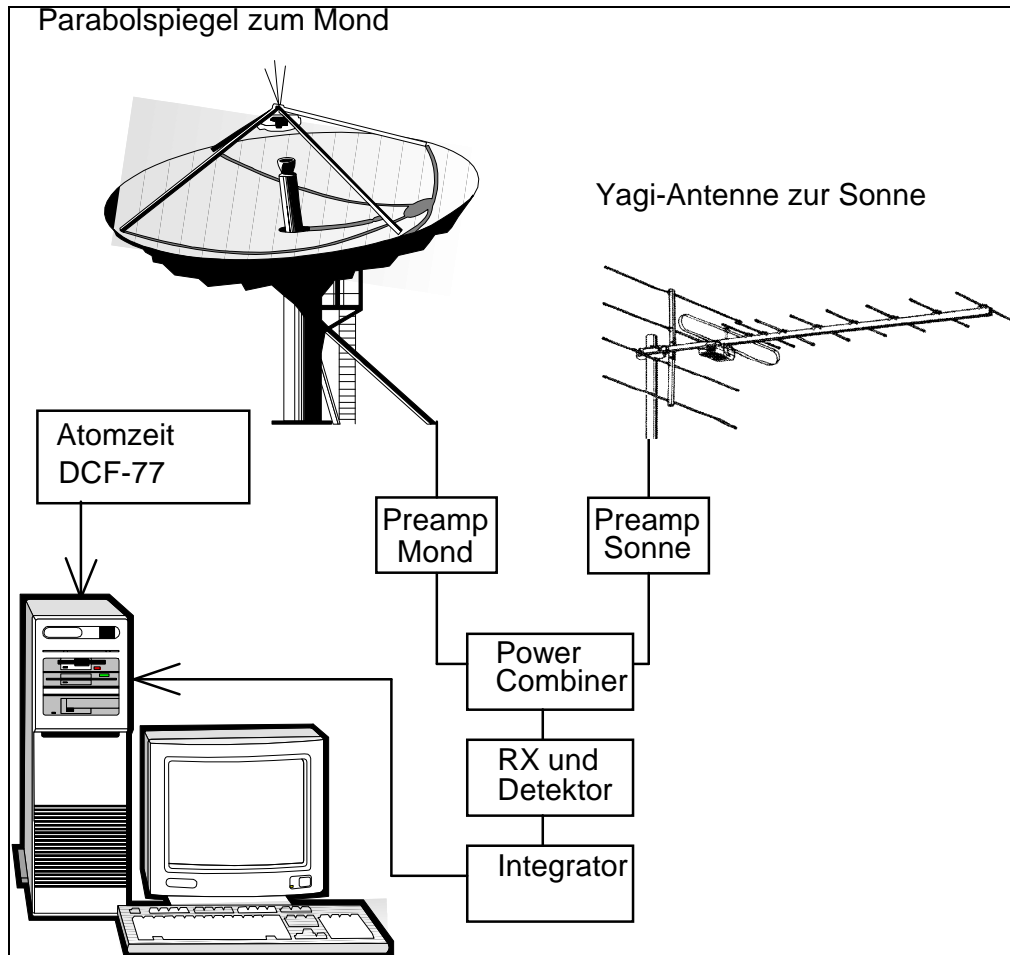
Die Kalibrationsquelle Cassiopeia A vom 12.09.1992 um 15:09 Uhr auf 435MHz über Kreuzdipol, SSB-Vorverstärker, 16dB Hochfrequenz-Dämpfung zwischen Konverter und Empfänger. Die Abszisse zeigt Azimut Teleskop minus Azimut Quelle, die Ordinate zeigt eine relative Skalierung (Digits vom A/D-Konverter). Die erste Nebenkeule liegt bei etwa $\pm 7^\circ$ neben der Hauptkeule, d.h. Mond und Sonne sollten bei gleichzeitiger Beobachtung mindestens 15° voneinander entfernt sein! Der Azimutfehler des Teleskops ist, wie aus dem Bild zu entnehmen ist, kleiner als $0,5^\circ$.



Aus einschlägigen Quellen ist bekannt, daß der Fluß bei 960MHz etwa 2440Jy und bei 178MHz etwa 8670 Jy beträgt. Bei einem Spektralindex von 0,77 beträgt der Fluß bei 435MHz folglich etwa 4428 Jy. Dieser Wert ist etwa 88 mal größer als der Fluß, den wir vom Mond erwarten können. Wenn wir die Kurve in Bild #3 durch 88 teilen, sehen wir

wie groß ein Monddurchlauf etwa sein könnte. Ein Monddurchlauf würde im Rauschen untergehen. Daher ist die Autokorrelation als 'off line filter' zwingend notwendig.

Bild #4: Blockscha der Empfangsanlage:



4. Mathematischer Apparat

Für die nachfolgenden Analysen und Berechnungen werden die verschiedensten Vektoren und Parameter benötigt. Sie werden im Verlaufe der Entwicklung sukzessive benannt und definiert. Als Basis für alle Berechnungen dienen die geographischen Koordinaten des Standortes Ermenswil (Lütschbach) mit östlicher Länge $\lambda=8,909961^\circ$, nördlicher Breite $\beta=47,250710^\circ$, Höhe über Normalnull $h=560\text{m}$ und aktuelle Zeit (abgeleitet aus DCF77). Daraus werden die geozentrischen und die topozentrischen Koordinaten sowie die Zentrumsdistanzen von Mond und Sonne berechnet. Die Lokalsternzeit wird ebenfalls aus obigen Daten berechnet. Diese Koordinaten, Parameter und Zeiten werden berechnet für jeden beliebigen Zeitpunkt nach den Anleitungen von Jean Meeus /1/ in TURBO PASCAL mit der Methode VSOP87 (Variations Séculaires des Orbites Planétaires nach P. Bretagnon, Bureau des Longitudes in Paris 1987). In diesen Formeln werden **2430 periodische Terme** verwendet, so daß die Genauigkeit für Amateure voll genügt.

Allen Berechnungen zugrundegelegt wird das äquatoriale Koordinatensystem mit folgenden Einheitsvektoren nach Vershuur & Kellermann /5/:

\hat{e}_x zeigt nach $\delta = 0^\circ$, $h = 0h$,
 \hat{e}_y zeigt nach $\delta = 0^\circ$, $h = 6h$,
 \hat{e}_z zeigt nach $\delta = 90^\circ$ (Linkshändiges System).

Die Basislinie ist ein Vektor von der Erde zum Mond zeigend. Von dieser Basislinie gibt es verschieden exakte Varianten, die einfachste von VSOP87 verfügbare Variante ist die Distanz Mittelpunkt Erde zum Mittelpunkt des Mondes (Vektor \mathbf{B}_{ZZ} mit Betrag L_{ZZ}). Im Verlaufe der weiteren Analysen muß berücksichtigt werden, daß der Reflexionspunkt am Mond eben nicht im Zentrum, sondern immer an dem der Sonne zugewandten Rand stattfindet. Zudem befindet sich der Beobachter bzw. die Antenne nicht im Zentrum der Erde, sondern auf deren Oberfläche. Damit muß der Vektor \mathbf{B}_{ZZ} mit mehreren Korrekturen (Zusatzvektoren) versehen werden, damit die wahre Distanz bzw. die wirksame Basislinie $\mathbf{B}_{\text{tt}}=\mathbf{B}$ berechnet werden kann. Die Suffixe $_{ZZ}$ bedeuten geozentrisch bzw. selenozentrisch, d.h. zeigend vom Zentrum der Erde zum Zentrum des Mondes. Die Suffixe $_{\text{tt}}$ stehen für topozentrisch, d.h. zeigend vom Antennenstandort auf der Erde (top) zum Reflexionspunkt auf der Mondoberfläche (top). Eine Mischform mit dem Suffix $_{tz}$ zeigt vom Beobachtungspunkt auf der Erde zum Mondmittelpunkt.

4.1. Berechnung der wahren Basislinie

Der Basislinien-Vektor vom Erd- zum Mondzentrum wird berechnet über die geozentrischen Koordinaten des Mondes nach /1/.

$$\mathbf{B}_{zz} = L_{zz} \cdot \begin{pmatrix} Bx_{zz} \\ By_{zz} \\ Bz_{zz} \end{pmatrix} = L_{zz} \cdot \begin{pmatrix} \cos(D_{geo}) \cdot \cos(H_{geo}) \\ \cos(D_{geo}) \cdot \sin(H_{geo}) \\ \sin(D_{geo}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

mit den geozentrischen Koordinaten D_{geo} (Deklination), H_{geo} (Stundenwinkel) des Mondes zum Zeitpunkt t . Der Betrag von \mathbf{B}_{ZZ} heißt L_{ZZ} und wird wie oben nach /1/ berechnet. Der Beobachterstandort außerhalb des Erdmittelpunktes kann ebenfalls mit einem Vektor vom Erdmittelpunkt her zeigend beschrieben werden.

$$\mathbf{Re} = (Re_0 + h) \cdot \begin{pmatrix} \cos(D_{ant}) \cdot \cos(H_{ant}) \\ \cos(D_{ant}) \cdot \sin(H_{ant}) \\ \sin(D_{ant}) \end{pmatrix} = (Re_0 + h) \cdot \begin{pmatrix} \cos(D_{ant}) \\ 0 \\ \sin(D_{ant}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

mit $Re_0=6378140m$, $h=560m$ und D_{ant} =Deklination des Zenits= $47,250710^\circ$. Der Stundenwinkel des Standortes (local hour angle lha) ist hier immer null.

Mit (7) und (8) kann nun die Basislinie zwischen Beobachter und Mondzentrum vektoriell berechnet werden. Diese Distanz ist immer kleiner als die Zentrumsdistanz Erde-Mond.

$$\mathbf{B}_{tz} = \mathbf{B}_{zz} - \mathbf{Re} \quad (9)$$

Der Quellenvektor \mathbf{S} (Einheitsvektor) zur Sonne zeigend wird nicht unterschieden bezüglich geozentrisch oder topozentrisch, da die Distanz groß genug ist für die notwendigen Genauigkeiten im Amateurbereich

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(d_{sol}) \cdot \cos(h_{sol}) \\ \cos(d_{sol}) \cdot \sin(h_{sol}) \\ \sin(d_{sol}) \end{pmatrix} \quad (10)$$

hierbei sind d_{sol} die Deklination und h_{sol} der Stundenwinkel des Sonnenzentrums. Derselbe Einheitsvektor wird auch aus Sicht des Mondes verwendet und berechnet nach /1/. Der Winkel zwischen Sonne und Mond (Spacing) kann mit Hilfe des Skalarprodukts ermittelt werden. Der Winkel darf wegen des relativ großen Öffnungswinkels der Antenne nicht zu klein gewählt werden. Exakterweise muß man auch hier unterscheiden zwischen geozentrischer Elongation Θ_{geo} , topozentrischer Elongation Θ_{top} und wahrer topozentrischer Elongation Θ_{tt} . Maßgebend für die Berechnung der Verzögerungszeiten τ ist die wahre topozentrische Elongation. Bis hierher sind nur die geozentrische und die topozentrische Elongation berechenbar, die wahre topozentrische Elongation Θ_{tt} folgt erst nach der Berechnung des Reflexionspunktes auf dem Mond.

$$\Theta_{geo} = \arccos \frac{\mathbf{B}_{zz} \cdot \mathbf{S}}{|\mathbf{B}_{zz}| \cdot |\mathbf{S}|} \quad (11)$$

und

$$\Theta_{top} = \arccos \frac{\mathbf{B}_{tz} \cdot \mathbf{S}}{|\mathbf{B}_{tz}| \cdot |\mathbf{S}|} \quad (11a)$$

Damit nun der exakte Reflexionspunkt auf dem Mond berechnet werden kann, muß zuerst der Phasenwinkel i bzw. die selenozentrische Elongation i berechnet werden. Dafür gibt es verschiedene Methoden. Ich wähle die Methode, welche am wenigsten Schreibarbeit erfordert und damit am wenigstens fehleranfällig sein sollte. Die selenozentrische Elongation beschreibt, wie ein Beobachter auf dem Mond die Sonne und die Empfangsanlage auf der Erde sieht. Die Hälfte von i beschreibt den Einfallswinkel bzw. den Ausfallswinkel der Radiostrahlen von der Sonne via Mond zur Erde. Der Phasenwinkel i wird später auch benötigt zur Ermittlung der beleuchteten Fläche des Mondes.

$$i = \arccos \left(\frac{-\mathbf{B}_{tz} \cdot \mathbf{S}}{|\mathbf{B}_{tz}| \cdot |\mathbf{S}|} \right) \quad (13)$$

Der Vektor \mathbf{Rm} vom Mondzentrum zum Reflexionspunkt zeigend kann nun berechnet werden aus den bereits bekannten Vektoren \mathbf{S} , \mathbf{B}_{tz} und Rm_0 .

$$\mathbf{Rm} = Rm_0 \cdot \left(\mathbf{S} - \frac{\mathbf{B}_{tz}}{|\mathbf{B}_{tz}|} \right) \quad \text{mit } Rm_0 = 1738\text{km.} \quad (14)$$

$$c1 = c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{S} \quad (17) \quad \text{und analog:}$$

$$c2 = c + \mathbf{V} \cdot \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \quad (18)$$

wobei für \mathbf{V} gemäß verschiedener Publikationen (Conklin, Henry, Smooth, Marinov...) gilt:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_0 \cdot \cos(\delta_0) \cdot \cos(h_0) \\ V_0 \cdot \cos(\delta_0) \cdot \sin(h_0) \\ V_0 \cdot \sin(\delta_0) \end{pmatrix} \quad (19)$$

mit $V_0=300\pm 20$ km/sec, $\delta_0=-21^\circ\pm 4^\circ$ und
 $h_0 = lha - \alpha_0 = lha - (13.3h \pm 0.3h)$ /Marinov 1974/ (20)

Die für die Interferenzen relevanten Lichtlaufzeitverzögerungen τ (hier nur für die Absolutisten) lauten dann

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{-L \cdot \cos(\Theta)}{c1} + \frac{L}{c2} = \frac{-\mathbf{B} \cdot \mathbf{S}}{c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}} + \frac{|\mathbf{B}|}{c + \mathbf{V} \cdot \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}} \quad (21)$$

τ_1 bezeichnet dabei die Laufzeit in der Gegenkathete des Interferometers, diese ist bei einer topozentrischen Elongation von 90° exakt = 0. τ_2 bezeichnet die Laufzeit vom Mond zur Erde. Direkt gemessen mit dem Korrelationsinterferometer kann leider nur die **Summe** der beiden Laufzeiten: $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

4.2. Interferometer-Funktion

Die am Eingang des Interferometers induzierte Antennenspannung des Sonnensignals ist idealerweise

$$us = \hat{us} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (22)$$

Die induzierte Antennenspannung des via Mond verzögerten Sonnensignals beträgt

$$um = \hat{um} \cdot \cos[\omega \cdot (t + \tau)] \quad (23)$$

Nach der Addition von us und um im Power-Combiner (koaxialer Viertelwellentransformator) und nach Detektion und Integration im Empfangszweig bleibt als Rest näherungsweise das Signal $r(t)$ {time average energy nach Dr. J.P. Wesley} übrig

$$r(t) = \hat{u}s \cdot \hat{u}m \cdot \cos[\omega \cdot \tau(t)] + \frac{\hat{u}s^2 + \hat{u}m^2}{2} \quad (24)$$

Für den unwahrscheinlichen Idealfall, daß $\hat{u}s = \hat{u}m = u$ ist, wird

$$r(t) = 2 \cdot u^2 \cdot \cos^2[\pi \cdot f \cdot \tau(t)] \quad (25)$$

Für den zusätzlichen Spezialfall, daß $\Theta = \pi/2 = 90^\circ$ und c in allen Richtungen konstant ist, wird

$$r(t) = 2 \cdot u^2 \cdot \cos^2\left[\pi \cdot f \cdot \frac{L(t)}{c}\right] = 2 \cdot u^2 \cdot \cos^2\left[\pi \cdot \frac{L(t)}{\lambda}\right] \quad (26)$$

Diese Gleichung (26) ist eine der grundlegenden Gleichungen der Interferometrie. Da nun aber nach Meinung des Autors weder $\hat{u}s = \hat{u}m$, noch $c = \text{konstant}$ ist, gilt daher

$$r(t) = \hat{u}s \cdot \hat{u}m \cdot \cos\left\{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\frac{-L(t) \cdot \cos[\Theta(t)]}{c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}(t)} + \frac{L(t)}{c + \mathbf{V} \cdot \frac{\mathbf{B}(t)}{|\mathbf{B}(t)|}}\right]\right\} + \frac{\hat{u}s^2 + \hat{u}m^2}{2} \quad (27)$$

zusammen mit (11) kann (27) für Absolutisten noch etwas vereinfacht werden:

$$r(t) = \hat{u}s \cdot \hat{u}m \cdot \cos\left\{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\frac{-\mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{S}(t)}{c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}(t)} + \frac{|\mathbf{B}(t)|}{c + \mathbf{V} \cdot \frac{\mathbf{B}(t)}{|\mathbf{B}(t)|}}\right]\right\} + \frac{\hat{u}s^2 + \hat{u}m^2}{2} \quad (28)$$

Diese Gleichung (28) (wiederum vereinfacht für Relativisten) ist nach R. Wohlleben /6/ eine der grundlegenden Gleichungen der Interferometrie.

$$r(t) = \hat{u}s \cdot \hat{u}m \cdot \cos\left\{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\frac{-\mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{S}(t)}{c} + \frac{|\mathbf{B}(t)|}{c}\right]\right\} + \frac{\hat{u}s^2 + \hat{u}m^2}{2} \quad (28a)$$

4.3. Beleuchtete Fläche

Für Qualität und Intensität des Interferometersignales ist von ausschlaggebender Bedeutung die reflektierende Fläche (3) auf dem Mond. Mit Kenntnis der selenozentrischen Elongation (13) kann die beleuchtete Fläche auf der Mondoberfläche exakt berechnet werden. Der Anteil der beleuchteten bzw. angestrahlten Fläche zur Gesamtfläche beträgt:

$$k = \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (29)$$

Falls $k \ll 1$ ist, dann sind Empfangsversuche aussichtslos. Für meine Beobachtungen gilt als Minimal-Kriterium $k > 0,5$. Die beleuchtete Fläche Ar' berechnet sich dann wie folgt:

$$Ar' = \frac{4 \cdot \pi \cdot Rm^2}{2} \cdot k = \pi \cdot Rm^2 \cdot [1 + \cos(i)] \quad (30)$$

wobei $Ar' \gg Ar$ aus (3) wegen der Limitierung durch die Wellenlänge λ .

5. Geplante Messungen

Messungen mit dem Sonne-Mond-Erde-Interferometer können nur unter bestimmten begrenzten Bedingungen durchgeführt werden. Diese sind:

- Mond und Sonne müssen gleichzeitig am Himmel stehen (sie müssen aber nicht optisch sichtbar sein)
- Mond und Sonne müssen außerhalb des terrestrischen Störpegels liegen, d.h. die Elevation beider muß $> 20^\circ$ sein. Die Sonne darf ausnahmsweise etwas tiefer stehen.
- Die Winkeldistanz (Topozentrische Elongation) zwischen Sonne und Mond muß viel größer sein als der Winkel der ersten Nebenkeule, d.h. $\Theta \gg 15^\circ$. (Idealerweise 90°)
- Mindestens ein Operateur für die Teleskopsteuerung muß verfügbar sein
- Mindestens ein Operateur für die Datenerfassung muß verfügbar sein

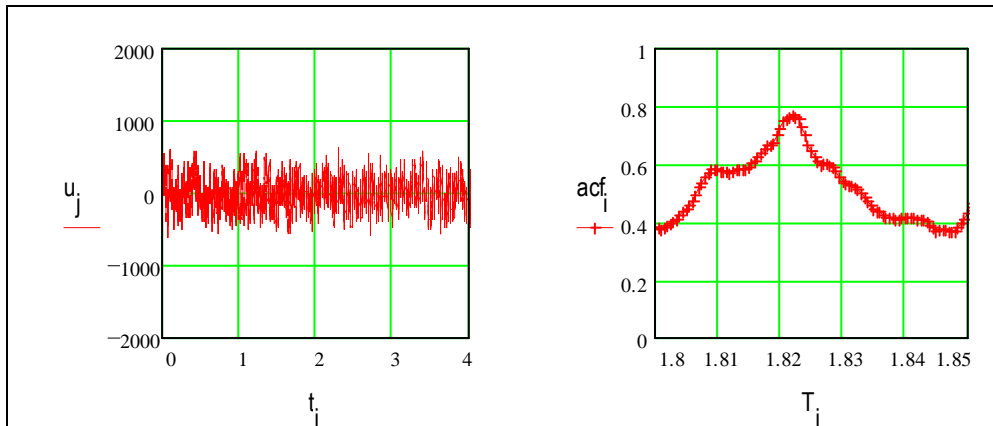
Für das Jahr 1994 gibt es mehrere Tage, wo alle Bedingungen erfüllt sind. Zu gegebenem Zeitpunkt soll der Hauptspiegel nach Winkel- und Fluß-Kalibration an Cassiopeia A und/oder Cygnus A automatisch dem Mond nachgeführt werden. Die separate Yagi-Antenne soll manuell auf die Sonne eingestellt und auch manuell nachgeführt werden. Etwa alle 5 Minuten soll ein Datenstrom mit maximaler Abtastrate vom Interferometer via A/D-Wandler im PC abgespeichert werden, synchronisiert über DCF77. Eine einzelne Messung soll so sein, daß wenigstens das Doppelte der erwarteten Laufzeit in einem kontinuierlichen Datenstrom abgespeichert werden kann. Zur Zeit sind mit den vorliegenden Mitteln Abtastraten bis 2 Tausend Messungen pro Sekunde praktisch realisierbar.

6. Auswertungen/Interpretationen

Die gespeicherten Messdaten sollen untersucht werden in Bezug auf Periodizität mit der (erwarteten Laufzeit) τ . Dafür eignen sich besonders die ACF (Autokorrelation) und/oder die FFT (Fast Fourier Transformation) mittels TURBO C, TURBO-PASCAL und/oder MATH-CAD. Die FFT wird zur Zeit auch benützt um eventuelle terrestrische Störungen zu erkennen um damit allfällig fehlerhafte Messreihen zu eliminieren. Die berechneten Basislinien zu jedem Zeitpunkt der Beobachtungen sollen durch die

gemessenen Laufzeiten τ dividiert und so zur Selbstkontrolle die Vakuumlichtgeschwindigkeit berechnet werden.

Bild #6: Konkretes Beispiel vom 20. Mai 1994 um 17:45:17 Uhr (Sommerzeit):



Das linke Diagramm zeigt die gemessene Rauschspannung am Ausgang des Demodulators/Integrators in Abhängigkeit der Meßzeit $0\text{sec} < t(i) < 4\text{sec}$. Auf der rechten Seite ist die berechnete und normierte Autokorrelationsfunktion mit einer deutlichen Überhöhung bei der (erwarteten) Laufzeit von $T=1,822155\text{sec}$. In diesem speziellen Fall kann nun die Lichtgeschwindigkeit berechnet werden. Zum Zeitpunkt 17:17:45 beträgt die exakt berechnete Distanz bzw. Basislinie $L=367663593.6\text{m}$ und die berechnete topozentrische Elongation $\Theta=119.2391^\circ$. Die daraus zu berechnende Vakuumlichtgeschwindigkeit c' beträgt somit:

$$c' = \frac{L}{T} \cdot [1 - \cos(\Theta)] = 3.003 \cdot 10^8 \text{ m/sec} \quad (31)$$

Dieser berechnete Wert ist etwas größer (Fehler 0,16% oder 507km/sec) als der per Dekret festgelegte Wert für c von 1983. Für mich als Amateurradioastronom ist dies aber ein durchaus positives Resultat, ist es doch nicht ganz einfach mit den begrenzten Mitteln eines Amateurs brauchbare Resultate zu erzielen. Ich werde dieses Jahr mit weiteren Messungen versuchen das Ergebnis statistisch weiter zu untermauern mit dem Endziel die Geschwindigkeit \mathbf{V} unseres Sonnensystems gegenüber dem galaktischen Hintergrund zu berechnen. (Vergleiche Geschwindigkeitsvektor \mathbf{V} in Abbildung #5). Am 20. Mai dieses Jahres wurde nicht nur obiges Beispiel, sondern noch 32 weitere Messungen durchgeführt mit folgendem Zwischenergebnis für c' :

Minimum:	295'863'235 m/sec
Mittelwert:	299'353'276 m/sec
Maximum:	307'229'421 m/sec
Streuung σ :	1'971 km/sec

Die Streuung ist deshalb relativ groß, weil der Reflexionspunkt auf der Mondoberfläche kein ebener Reflektor, sondern undefiniert gebirgig ist. Die Streuung beträgt allein aus diesem Grund bereits etwa 1500km/sec! Sobald die Streuung in den Meßwerten der Laufzeit T entweder durch verbesserte Technologie oder statistisch durch sehr viele

Messungen reduziert werden kann, besteht die Hoffnung durch Umstellen von (21) und der Kenntnis von \mathbf{B} , \mathbf{S} , c und T den Vektor \mathbf{V} zu berechnen, also $\mathbf{V} = f(\mathbf{B}, \mathbf{S}, c, T)$.

7. Vorläufiges Ergebnis

Es wäre zu schön gewesen, wenn die Gleichung (21) nach \mathbf{V} umgestellt werden könnte. Da die Gleichung nicht skalar, sondern vektoriell ist (Gleichung mit 3 Unbekannten) muß eine andere Lösung gefunden werden. Als Praktiker habe ich mich für die 'Monte-Carlo-Methode' /9/ entschieden um in endlicher Zeit zu einem brauchbaren Ergebnis zu kommen. Die 'Monte-Carlo-Methode' ist ein besonderer Zweig der experimentellen Mathematik und läßt sich mit dem PC sehr leicht programmieren. Mit anderen Worten, die Gleichung (21) wird so lange mit verschiedenen Varianten und Kombinationen von \mathbf{V} ($v_0=0...2000\text{km/sec}$, $\alpha_0=0^\circ...360^\circ$ und $\delta_0=-90^\circ...+90^\circ$) gefüttert, bis die berechnete bzw. simulierte Laufzeit $T_{\text{simulated}}$ gleich oder annähernd der gemessenen Laufzeit T_{measured} wird. Ohne Computer wäre diese Aufgabe nicht oder zumindest kaum lösbar. Für die bis heute verarbeiteten Meßwerte ergibt sich pro Meßtag folgendes Bild:

Messtag	v_0	α_0	δ_0
20.04.1994	(1007±240) km/sec	(11±4) h	(21±26) °
19.05.1994	(496±264) km/sec	(13±5) h	(2±21) °
20.05.1994	(621±187) km/sec	(13±8) h	(-2±33) °
17.06.1994	(798±555) km/sec	(11±8) h	(0±48) °
18.06.1994	(801±540) km/sec	(13±7) h	(-7±51) °
Kumulation	(692±468) km/sec	(11.7±7.2) h	(0.2±44) °

8. Anhang und Literaturverzeichnis

/1/ Jean Meeus, Astronomische Algorithmen, Verlag Johann Ambrosius Barth Leipzig 1992, ISBN 3-335-00318-7. [Beiliegende Software auf Disketten von Jeffrey Sax (C)].

/2/ Kristen Rohlf, Tools of Radio Astronomy, Springer-Verlag Berlin 1986, ISBN 3-540-16188-0.

/3/ 10m-Amateur-Radioteleskop, Verantwortlich Léon Kälin, Lütschbachtrasse 10, 8734 Ermenswil, Tel. (0)55 / 863443, Koordinaten Teleskop: - östlicher Länge $\lambda=8,909961^\circ$, nördlicher Breite $\beta=47,250710^\circ$, Höhe über Normalnull $h=560\text{m}$, Übername: Radioteleskop "Ricken Süd".

/4/ H. Meinke / F. W. Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag Berlin 1968, ISBN 3-540-04359-4.

/5/ Gerrit L. Verschuur / Kenneth I. Kellermann, Galactic and Extra-Galactic Radio Astronomy, Springer-Verlag 1974, ISBN 3-540-06504-0.

/6/ R. Wohlleben / H. Mattes / Th. Krichbaum, Interferometry in Radioastronomy and Radar Techniques, Kluwer Academic Publishers 1991, ISBN 0-7923-0464-0.

/7/ S. Marinov, Spec. Sci. Tech. 3, 57 (1980a), measurement of the oneway energy velocity of light using two toothed wheels.

/7.1/ S. Marinov, Gen. Rel. Grav. 12, 57 (1980b), coupled mirrors experiment to measure the absolute velocity of the closed lab.

/7.2/ J. P. Wesley, Selected Topics in ADVANCED FUNDAMENTAL PHYSICS, Benjamin Wesley 1991, ISBN 3-9800942-4-3.

/8/ Chr. Monstein, ORION 254, Februar 1993 Seite 37/38. Werkzeuge für den Amateurastronomen.

/9/ Prof. Dr. Erich Soom, Monte-Carlo-Methoden und Simulationstechnik, Statistische und mathematische Methoden für die Fertigung II, Blaue TR-Reihe Heft 82 , Hallwag Verlag Bern und Stuttgart 1967.