

# Die Mondtemperatur bei $\lambda=2.77\text{cm}$

Christian Monstein

**Abriss.** Das Studium der thermischen Radiostrahlung des Mondes und der Planeten begann 1946 mit der Entdeckung der thermischen Radiostrahlung des Mondes bei der Wellenlänge von 1.25cm durch Dicke und Beringer [1]. Drei Jahre später folgte eine umfassende Untersuchung der Strahlung des Mondes ebenfalls bei der Wellenlänge von 1.25cm durch Piddington und Minnett [2]. Diese zeigte, dass die thermische Strahlung sich während des Mondzyklusses mehr oder weniger sinusförmig veränderte. Die Änderungen der Strahlungstemperatur waren allerdings viel kleiner als die aus Infrarotmessungen bereits bekannte Oberflächentemperatur. Das Maximum der Radiostrahlung war etwa 3.5 Tage nach dem Maximum bei Vollmond. Mit den damals zur Verfügung stehenden unempfindlichen Instrumenten war es extrem schwierig wenige Kelvin Strahlungstemperatur zu messen bei einer Systemtemperatur von einigen Tausend Kelvin. Nun, 55 Jahre später wiederhole ich diese Experimente mit Standard Komponenten aus dem Supermarkt. Heutzutage kann man ein komplettes Satellitenempfangssystem bestehend aus Parabolspiegel, LNC (low noise converter) und Satelliten Empfänger für den Frequenzbereich 10.7GHz bis 12.7GHz kaufen für weniger als 200 Franken. Ein solches Satellitenempfangssystem zeigt eine etwa 100 mal geringere Systemtemperatur (Eigenrauschen) auf, als die Originalanlage von Dicke und Beringer, wir können also eine Systemtemperatur  $T_{\text{sys}}=70$  Kelvin erwarten. Mit diesem Aufsatz möchte ich zeigen, dass es möglich ist klassische Astronomische Experimente mit günstiger Hardware im Amateurbereich durchführen. Meine eigenen Messungen über zwei komplette Mondzyklen vom 6. Januar 2001 bis und mit 8. März 2001 bestätigen weitestgehend die Ergebnisse von Dicke und Beringer sowie einigen anderen Autoren [3, 4, 5]. Ich fand eine mittlere Scheibentemperatur der Mondoberfläche von  $T_{\text{mean}}=213$  Kelvin. Das Minimum über zwei Mondzyklen betrug etwa  $T_{\text{min}}=192$  Kelvin etwa 2,5 Tage vor Vollmond, während das Maximum mit etwa 236 Kelvin etwa 5 Tage nach Vollmond zu finden wahr.

**Stichworte:** Mondtemperatur, verzögertes Strahlungsmaximum, atmosphärische Absorption, Systemtemperatur, Schwarzkörperstrahlung, Geostationäre Satelliten, Rauschzahl.

## 1. Einführung

Im optischen Wellenlängenbereich sieht man den Mond und die Planeten vorzugsweise durch das von der Sonne reflektierte Licht. Sehr wenig Strahlung wird von diesen Körpern in Form von Schwarzkörperstrahlung emittiert. Im Radiobereich ist die Situation allerdings umgekehrt, die reflektierte Sonnenstrahlung ist extrem gering im Vergleich zur thermischen Schwarzkörperstrahlung. Die Infrarot-Temperaturverteilung ist symmetrisch zur Vollmondphase mit der höchsten Temperatur bei Vollmond und einem Strahlungsminimum bei Neumond. Die Mikrowellenstrahlung hingegen zeigt nicht nur eine Phasenverschiebung von einigen Tagen, sondern sie ist auch asymmetrisch zum thermischen Maximum bei Vollmond. Hier berichte ich nun über die Beobachtung der lunaren Radiostrahlung bei einer Wellenlänge von  $\lambda=2.77\text{cm}$ , entsprechend einer Mikrowellenfrequenz von  $f=10.83\text{GHz}$  am unteren Ende des Satelliten Ku-Bandes. Es soll verifiziert werden, ob es möglich ist mit einem Billigangebot eines Satellitenempfängers, also mit Amateurmitteln, die Strahlung überhaupt zu messen. Falls die Strahlung tatsächlich registriert werden kann, so soll versucht

die Phasenverschiebung von  $\Delta T=3.5$  zu bestätigen. Die Messmethoden müssen selbstverständlich entwickelt und optimiert werden, so dass Antennentemperaturen von wenigen Kelvin mit vernünftiger Stabilität und Empfindlichkeit erfasst werden können über wenigstens 2 volle Mondzyklen. Die erwartete Antennentemperatur ist weniger als 8 Kelvin, daher müssen alle denkbaren Störquellen eruiert und soweit wie möglich ausgeschlossen oder zumindest berücksichtigt werden können.

## 2. Messinstrumente

Das wichtigste Element wurde bereits erwähnt, ein Billig-Satellitenempfänger aus einem Supermarkt in der Nähe von Zürich. Die Rauschzahl NF (noise figure) gemäss der beiliegenden Spezifikation ist besser als  $NF=0.9\text{dB}$ , dies entspricht bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von  $20^\circ\text{C}$  etwa  $T_{\text{sys}}=70\text{ Kelvin}$ . Das ist etwa 100 mal besser als der Empfänger von Dicke und Beringen 1946. Die Parabolantenne zusammen mit dem LNC wurde saprophytisch am Westrand der 5m Parbolantenne des Astronomischen Institutes der ETHZ montiert. Diese Montagemethode erlaubt es mir, die Antenne auf den Mond zu positionieren und diesen auch automatisch zu verfolgen mittels einer bestehenden PC-Steuerung. Das ist allerdings nur möglich, wenn die Antenne während der Nacht nicht für astronomische Forschungen benötigt wird. Die Radioastronomen in Zürich messen vorzugsweise die Sonne, somit ist die Antenne in der Nacht für andere Zwecke oder Versuche verfügbar.



**Fig. 1:** 80cm Satellitenspiegel montiert an einem 5m-Spiegel im Radioobservatorium in Bleien AG. Das Observatorium mit der Empfangsanlage ist etwa 50m östlich von der Antenne (im Bild recht des Turmes).

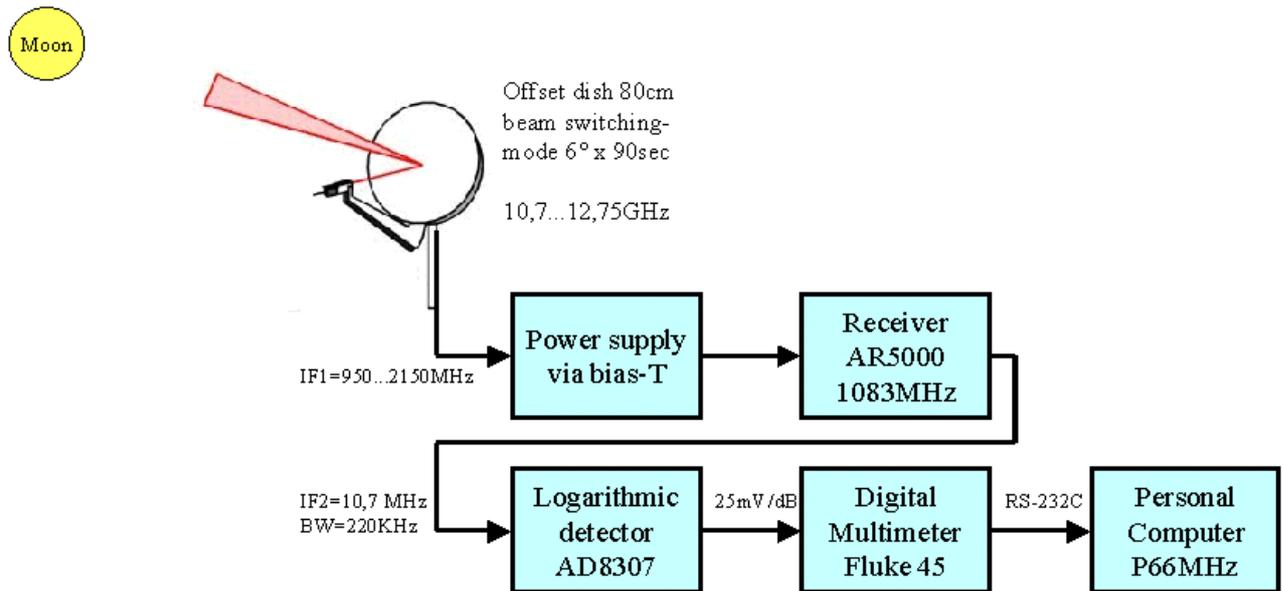
Die PCs können über das Internet überwacht und beeinflusst werden mit dem Gratis-Programm VNC (virtual network computing). Damit ist es sehr einfach alle Messungen und Kontrollfunktion bequem von zu Hause auszuführen. Der Steuer-PC verfolgt nicht nur den Mond, sondern er erlaubt es auch eine spezielle Messmethode durchzuführen nämlich das "beam-switching". Damit ist möglich geringste Strahlungsunterschiede bei veränderlicher Hintergrundstrahlung präzise aufzunehmen. Der LNC wird gespeist über ein sogenanntes "bias-T", eine Schaltung um Gleichstrom störungsfrei in ein Koaxialsystem einzuspeisen. Der LNC benötigt etwa 15Volt Spannung, diese wird direkt aus dem Observatorium bezogen und

zur Verfügung gestellt. Die stark frequenzabhängige Dämpfung des 50m langen Koaxialkabels zwischen LNC und Empfänger wird weitestgehend kompensiert durch einen sogenannten "equalizer" aus der Fernseh- und Rundfunkbranche. Die erste Satellitenzwischenfrequenz IF (intermediate frequency) von 950MHz bis 1.95GHz wird einem Standard Kommunikationsempfänger AR5000 zugeführt um die gewünschte Empfangsfrequenz einzustellen, das Signal zu verstärken und ein schmales Band von  $B=220\text{KHz}$  auswählen zu können. Eine höhere Bandbreite wäre zwar wünschenswert um das Signal zu Rauschverhalten SNR zu verbessern. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass Interferenzen verursacht werden durch die vielen Satelliten auf der geostationären Bahn. Die zweite Zwischenfrequenz von 10.7MHz am Ausgang des Empfängers wird direkt einem logarithmischen Detektor AD8307 von Analog Devices zugeführt. Dieser hat eine kalibrierte Umsetzungskonstante von exakt 25mV pro dB Hochfrequenzleistung und dient dazu die geringe Hochfrequenzleistung präzise zu messen. Der Analogausgang des logarithmischen Detektors wird gemessen mit einem programmierbaren Standard Labormultimeter FLUKE45. Der Daten- Ausgang RS232 des Multimeters ist mit einem zweiten PC verbunden über die serielle Schnittstelle COM1. Dieser liest über ein selbst geschriebenes Programm periodisch die Daten und speichert sie zusammen mit der Uhrzeit (UT) auf dem lokalen Harddisk in einem transparenten ASCII-Format. Dieses kann anschliessend sehr einfach ausgewertet werden mit einem Spreadsheetprogramm wie EXCEL oder einem ähnlichen Produkt. Die Daten auf dem Harddisk können zudem mit ftp (file transfer protocoll) nach Hause transportiert und dort weiter verarbeitet werden..

### **3. Messmethoden**

#### **3.1 Frontend**

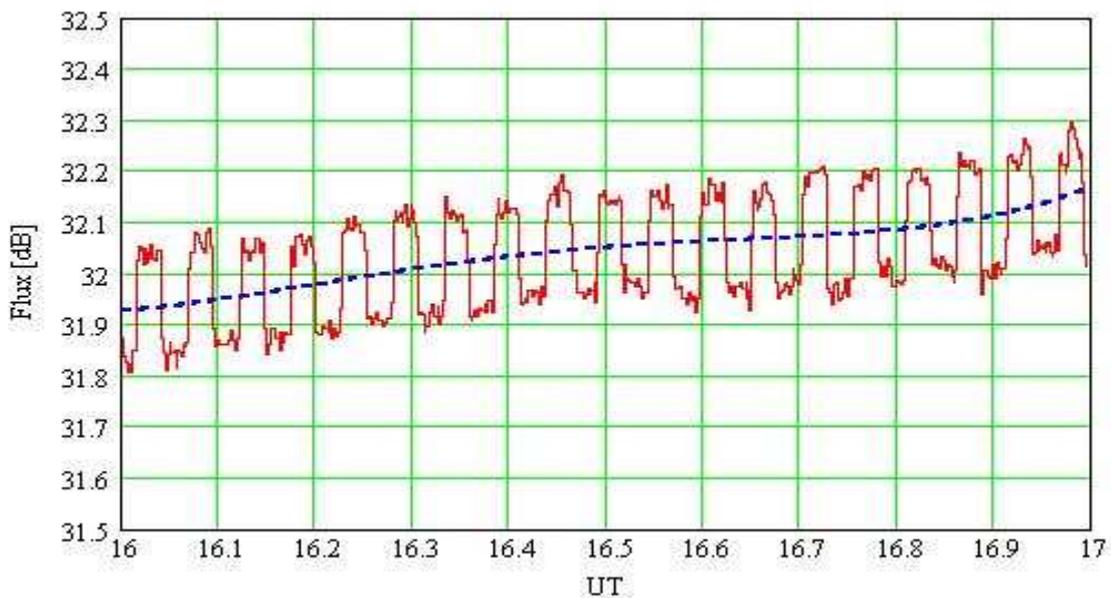
Es ist eine bekannte Tatsache, dass die Hintergrundstrahlung des Himmels eine nichtlineare Funktion der Teleskopelevation ist, weil einerseits die thermische Strahlung des Horizontes die Himmelsstrahlung extrem stört, andererseits täglich unerwünscht die Galaxis sich im Antennendiagramm befindet. Daher benötige ich eine Methode diese nichtlinearen Effekte zu kompensieren. Dafür benutze ich wie bereits oben erwähnt die Methode des beam-switching um veränderliche Hintergrundstrahlung wegzukompensieren. Bereits Dicke benutzte vor 55 Jahren eine ähnliche Methode. Die Methode ist derart, dass die Antenne während  $\Delta t=90$  Sekunden auf den Mond zeigt dann so rasch wie möglich um  $\Delta\alpha=6^\circ$  neben den Mond fährt um die Hintergrundstrahlung zu erfassen für ebenfalls  $\Delta t=90$  Sekunden. Diese Sequenz wird PC-gesteuert automatisch wiederholt solange sich der Mond über dem Horizont in Bleien befindet. Die gewählte Schaltzeit von  $\Delta t=90$  Sekunden muss natürlich angepasst werden an die Integrationszeiten im Empfangssystem. Ausserdem sollte sie kürzer sein als allfällig zu erwartende Temperaturdriften im LNC, im Empfänger oder im Detektor. Die nominale Schaltzeit muss höher sein als die Integrationszeit, es hat sich bei Versuchen gezeigt, dass in meiner Konfiguration eine Schaltzeit von  $\Delta t=90$  Sekunden ein guter Kompromiss darstellt der hingegen für andere Anlagen nicht gelten muss. Der Auslenkwinkel von  $\Delta\alpha=6^\circ$  ist ein weiterer Kompromiss, der Auslenkwinkel muss grösser sein als der Öffnungswinkel des Teleskops. Auf der anderen Seite muss er aber so klein wie möglich sein, damit nicht wertvolle Messzeit verloren geht durch die Hin- und Her-Fahrerei mit dem Radioteleskop.



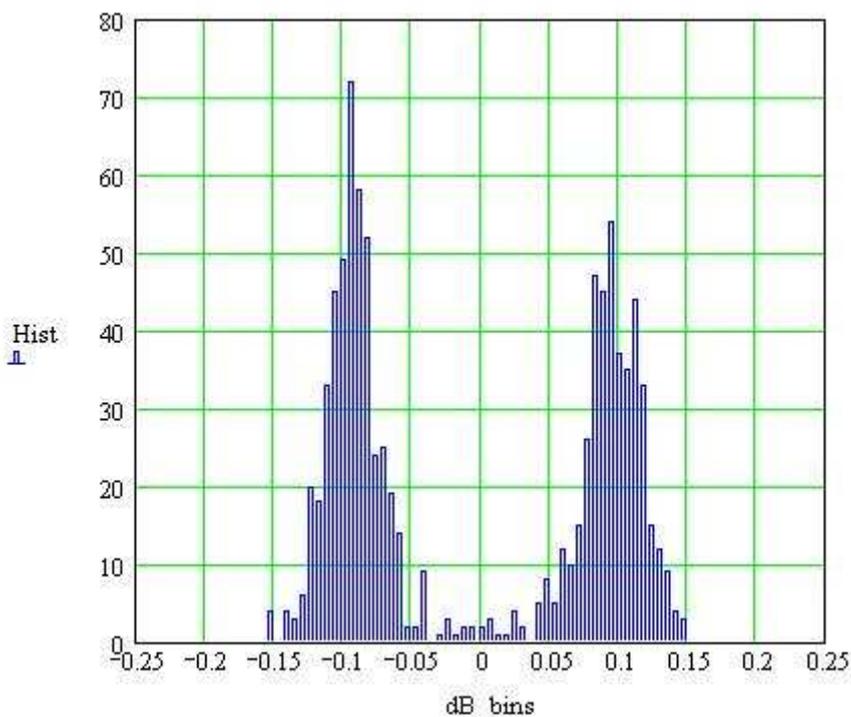
**Fig. 2:** Hardwarestruktur des Radio Astronomie-Empfangssystems von Antenne (links) via Empfänger zum Mess-PC (rechts).

### 3.2. Backend

Die täglich gesammelten Daten werden nach dem Datentransfer visualisiert auf dem heimischen PC unter Anwendung von EXCEL und/oder Math-CAD2000. Jedes Datenfile wird identifiziert über die Startzeit jeder Messung. Die Uhrzeit wird in Form der UT (universal time) in jedes File eingetragen, wobei die Uhrzeit über ein professionelles GPS-System des Observatoriums bezogen wird. Die täglichen Datenfiles werden aufgeteilt in stündliche Teilfiles mit jeweils 900 Messpunkten, dies erleichtert die Auswertung auf dem mit begrenzten Mitteln ausgerüsteten PC. Die mittlere Elevation  $\varepsilon$  des Teleskops muss für jedes Stundenfile berechnet werden zur Kompensation der atmosphärischen Dämpfung. Für Korrelationsversuche und für Visualisierungsprozesse benötige ich ebenfalls den Phasenwinkel  $\phi$ , den Durchmesser der Mondscheibe  $\Phi$  und den Beleuchtungsfaktor  $\xi$ . Alle diese Daten werden automatisch berechnet mit einem selbst geschriebenen C-Programm unter Windows ausgehend von Datum und Uhrzeit (UT). Um die Antennentemperatur berechnen zu können ist es wichtig die genaue Referenztemperatur  $T_{ref}$  zu kennen. In meiner Konfiguration verwende ich als erste Approximation die Umgebungstemperatur bei welcher der logarithmische Detektor arbeitet. Diese Werte können aus den "environmental data" des Phoenix-2 Radiospektrografen im Observatorium entnommen werden. Das environmental Datenfile wird automatisch täglich gespeichert auf dem Institutsrecher des Astronomischen Institutes und kann mit jedem Internetbrowser angeschaut werden unter <http://www.astro.phys.ethz.ch/rapp/>. Die Temperatur welcher der LNC ausgesetzt ist, kann ebenfalls dem Wetterfile entnommen werden bei einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute. In der weiteren Analyse wird sich allerdings zeigen, dass beide Temperaturen nicht geeignet sind als Referenztemperatur für die nachfolgenden Berechnungen. Es ist leider doch etwas komplizierter als ursprünglich erhofft.



**Fig. 3:** Bestimmung des mittleren Mondradioflusses in Dezibel durch Einsatz einer Fitfunktion um den Hintergrund vom Mondsignal zu trennen. Der langsam veränderliche Hintergrund auf Grund von veränderlicher Position und auf Grund schwankender Temperaturen im LNC und im Empfänger muss wegkompensiert werden.. Die durchgezogene Kurve wird daher punktweise von der gestrichelten Fitkurve subtrahiert Die statistische Untersuchung (Medianwert) des Differenzsignales führt zu einem einzelnen Flusswert, hier im Beispiel vom 16. Februar 2001 etwa 0.2dB. Die Fitkurve wird so bestimmt, das die Streuung des Residuums ein Minimum wird. In vorliegendem Beispiel wurde ein Fitpolynom 4ten Grades verwendet



**Fig. 4:** Histogramm der Daten aus dem File aus Fig. 3 oben. Der Funktion links im Bild zeigt die Verteilung der Hintergrundstrahlung, während die Funktion rechts die Verteilung der Mondradiostrahlung inklusive Hintergrund zeigt. Der Unterschied beider Funktionen wird gespeichert als Einzelwert ausgedrückt in Dezibel, hier im vorliegenden Beispiel sind es etwa

0.197dB entsprechend einer Antennentemperatur von etwa 4.4 Kelvin, dies bei einer mittleren Systemtemperatur von etwa 94 Kelvin.

### **3.3 Analyseschritte**

#### **3.3.1 Ausnahmenbehandlung**

Bevor die Daten detailliert verarbeitet werden können, muss geprüft werden ob diese plausibel sind, also überhaupt verwendet werden dürfen. Es gibt eine beliebige Anzahl von Interferenzmöglichkeiten die es auszuschliessen gilt. Alle 'mysteriös' ausschauenden Daten mit einer Streuung von mehr als 40 Kelvin wurden konsequent eliminiert. Es gibt im Verlaufe einer Mondphase mehrere solche Bedingungen mit unangenehmen Ergebnissen bei denen die Daten nicht verwendet werden sollten. Zum Beispiel am 15. Januar 2001 'verbarg' sich der Mond hinter der Bahn der geostationären Satelliten. Dies führt zu einem ungeheuren Anstieg der Radiostrahlung, der Mond ist nicht mehr sichtbar auf Grund der vielen blendenden Satelliten. Ein anderes kritisches Datum war der 24. Januar wo Mond und Sonne nahe beieinander stehen (Neumond). In diesem Fall ist die Radiostrahlung der Sonne einige tausend mal stärker als diejenige des Mondes, er wird komplett überstrahlt. Messungen in Horizontnähe sind auch nicht möglich einerseits der hohen Strahlungstemperatur wegen von 300 Kelvin und auch auf Grund der selbstgemachten Störstrahlung in der näheren Umgebung (man made noise). Ein weiterer kritischer Punkt zeigte sich in der Messmethode (beam switching) selbst. Die Methode verwendete vorerst nur horizontale Auslenkung (azimutal). Sobald der Mond höher als 45° Elevation zeigt, ist die horizontale Auslenkung nicht mehr sinnvoll, weil der am Himmel abgebildete Winkel reduziert wird um  $\cos(\epsilon)$ . Falls man damit im Zenit beobachten würde, wäre die Winkelauslenkung exakt = 0°, wir würden nur die Polarisations Ebene drehen was keine sinnvollen Messwerte mehr produziert. Daher erweiterten wir die Beobachtungsmethode durch die Möglichkeit der Auslenkung in Elevationsrichtung (vertikal). Diese Bewegung wird durch  $\cos(\epsilon)$  nicht beeinflusst. Alle nicht mit Ausnahmen belegten Datensätze wurden anschliessend nach der folgenden Methode analysiert und ausgewertet.

#### **3.3.2 Analyse**

Die für plausibel befundenen und gespeicherten Daten müssen zuerst in eine äquivalente Antennentemperatur umgerechnet werden, dies bei einer wohl definierten Referenztemperatur Tref. Da ein normaler Satelliten-LNC keine eingebaute Kalibrationsquelle aufweist, wurde mit drei verschiedenen Methoden versucht diese Referenztemperatur zu bestimmen. Die erste Methode benutzt die Rauschtemperatur des LNC vermehrt um die Verluste im Schutzdeckel des LNC, vermehrt um die atmosphärische Dämpfung plus Hintergrundstrahlung des Himmels. Diese Abschätzung führt zu einer Referenztemperatur von etwa 89 Kelvin. Die zweite Methode verwendet verschiedene Messungen der solaren Radiostrahlung gemessen durch die NOAA, woraus rückwärts die Referenztemperatur berechnet werden kann zu etwa 90 Kelvin. Und die dritte Methode benutzt die Umgebungstemperatur des Horizontes in Bleien, welche nach einiger Rechenarbeit eine Referenztemperatur von 104 Kelvin liefert. Mangels geeigneter statistischer Angaben über alle die drei Methoden verwende ich schlicht den Mittelwert zu  $T_{ref} = 94$  Kelvin.

$$T_a = T_{ref} \cdot \left( 10^{\frac{RF_{dB}}{10}} - 1 \right) \quad (1)$$

Die so berechnete Antennentemperatur ist zu klein auf Grund verschiedener mehr oder weniger gut bekannten Dämpfungsfaktoren. Die erste schlecht bekannte Dämpfung ist diejenige des Kunststoffdeckels des LNC's  $\gamma_c$ . Diese kann nur bestimmt werden, wenn man der LNC zerstört. Diese Methode liebe ich nicht besonders und verwende statt dessen einen Schätzwert aus der Literatur und berücksichtige Erfahrungen von Kollegen. Man darf annehmen, dass die Dämpfung im Bereich 0.1dB bis 0.3dB beträgt, ich habe mich für 0.1dB entschieden, da der LNC noch relativ neu und sauber ist. Das Resultat kann berichtigt werden, sobald der Deckel gemessen werden kann nach Abbruch des Experimentes.

$$\gamma_c = 10^{\frac{0.1dB}{10}} \quad (2)$$

Nun lässt sich die Antennentemperatur des Mondes auf der Erde berechnen, das ist aber noch immer nicht der endgültige Wert, weil die Atmosphäre eine bedeutende Rolle spielt bei diesen hohen Frequenzen. Die atmosphärische Dämpfung beträgt mindestens  $aa=0.22dB$  im Zenit. Der Wert variiert je nach Autor von 0.20dB bis 0.24dB und für Regenwolken sogar bis zu 1.5dB. Ich habe mich für den etwas pessimistischeren Wert von  $aa=0.22dB$  entschieden. Leider kann ich den Mond im Zenit nie messen, daher muss die Elevationsabhängige Dämpfung der Atmosphäre mathematisch erfasst werden. Verschiedene Publikationen behandeln diese Thematik sehr ausführlich. Die Lufthülle am Horizont ist deutlich dicker als im Zenit, daher ist die Dämpfung am Horizont auch ein Maximum. Die Dämpfung der Strahlung auf Grund der atmosphärischen Absorption reduziert den zu messenden Fluss merklich. Wenn  $S(z)$  der Fluss bei der Zenitdistanz  $z$  darstellt, und  $S_0$  der Fluss ausserhalb der Atmosphäre darstellt dann gilt:

$$S(z) = S_0 \cdot aa^{-X(z)} \quad (3)$$

hierbei ist  $aa$  die atmosphärische Dämpfung im Zenit bei der Luftmasse 1 und  $X(z)$  ist die relative Luftmasse in Einheiten der Luftmasse im Zenit. Für ein einfaches, flaches atmosphärisches Modell folgt damit:

$$X(z) = \sec(z) = \frac{1}{\cos(z)} \quad (4)$$

Schönberg 1929 [7] hat ausführliche Untersuchung für  $X(z)$  angestellt und ein Chebychev-fit für  $X$  bis 5.2 vorgeschlagen bei einem Fehler von weniger als 1 Promille zu:

$$X(z) = -0.0045 + \frac{1.00672}{\cos(z)} - \frac{0.002234}{\cos(z)^2} - \frac{0.0006247}{\cos(z)^3} \quad (5)$$

Für meine eigenen Berechnungen entschied ich mich für die einfachere Version gemäss (4). angewendet auf meine Konfiguration kann die atmosphärische Dämpfung  $\gamma_a$  berechnet werden zu:

$$\gamma_a = aa^{\sin(\varepsilon \cdot \frac{\pi}{180})^{-1}} \quad (6)$$

Gemäss Kraus, dem Papst der Radioastronomen [3] muss auch die Form und Grösse der Antenne mit berücksichtigt werden um die echte (propere) Antennentemperatur bestimmen zu können. In meiner Situation postuliert er einen Formfaktor  $\kappa$ , welcher mit etwa  $\kappa=1.02\pm 0.05$  anzusetzen ist. Weitere Messungen bei anderen Quellen würden helfen den Faktor genauer zu bestimmen. Alle bisherigen Korrekturfaktoren können nun zu einem gemeinsamen Korrekturfaktor  $\gamma$  zusammengefügt werden.

$$\gamma = \gamma_c \cdot \gamma_a \cdot \kappa \quad (7)$$

Damit sind wir in der Lage die endgültige Antennentemperatur  $T_p$  zu bestimmen als Basis für die eigentliche Mondtemperatur.

$$T_p = T_a \cdot \gamma \quad (8)$$

Die Berechnung der Mondtemperatur erfordert allerdings noch die Kenntnis der Geometrie des Antennenraumwinkels und dies so präzise wie möglich. Verschiedene Methoden zur Bestimmung des Raumwinkels sind bekannt, ich habe mich entschieden die Antennenparameter zu bestimmen mit Hilfe eines Transit Meridian Durchganges der Sonne am 12. Januar 2001 bei einer Deklination von  $\delta=-21.6^\circ$ . Die Normilisierung und Integration der Transitdaten führt zum sogenannten Richtfaktor  $D$  (directivity) jedoch leider jeweils nur für eine Polarisationsrichtung. Die Daten lassen sich nicht geschlossen integrieren, daher muss dies numerisch geschehen mit Hilfe des  $\Sigma$ -operators. Dazu benötigen wir zudem die Antennentemperatur der Sonne in physikalischen Einheiten wie z.B. in Kelvin:

$$RF = 300K \cdot \left( 10^{\frac{RFdB}{10dB}} - 1 \right) \quad (9)$$

Dann muss das Temperaturdiagramm normiert werden in den Bereich zwischen 0 und 1.0

$$RF_n = \frac{RF - \min(RF)}{\max(RF) - \min(RF)} \quad (10)$$

Die Analyse des normalisierten Strahlungsdiagrammes führt direkt zum Öffnungswinkel HPBW (half power beam width).

$$HPBW = 0.192h \cdot \frac{360^\circ}{24h} \cdot \cos\left(-21.6^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) = 2.88^\circ \quad (11)$$

Das normalisierte Strahlungsdiagramm kann nun numerisch integriert werden zum Zwischenergebnis S.

$$S = \sum_i RFn \cdot \delta\alpha \quad (12)$$

wobei

$$\delta\alpha = \frac{4 \text{ sec/sample}}{3600 \text{ sec/h}} \cdot \frac{360^\circ}{24h} = 0.017^\circ / \text{sample} \quad (13)$$

Der Richtfaktor D (directivity) kann somit quantifiziert werden zu

$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{180^\circ}{\pi}\right)^2}{S^2} = 4478 \quad (14)$$

Der Richtfaktor seinerseits kann direkt in einen Antennengewinn G umgerechnet werden welcher seinerseits sehr einfach mit anderen Methoden verglichen werden kann.

$$G = 10 \cdot \log(D) = 35.6 \text{ dB} \quad (15)$$

Wiederum nach Kraus [3] kann der Richtfaktor D umgerechnet werden in den uns tatsächlich interessierenden Raumwinkel (beam solid angle)  $\Omega_a$ , ausgedrückt in Quadratgrad.

$$\Omega_a = \frac{4 \cdot \pi}{D \cdot \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right)^2} = 9.212 \quad (16)$$

Auf der anderen Seite ist der scheinbare Durchmesser  $\Phi$  des Mondes nicht konstant, er ändert sich stündlich. Während sich die Mondphase  $\phi$  ändert, ändert logischerweise auch der scheinbare Durchmesser einige Prozente. Die mehreren hundert Messwerte wurden daher numerisch bestimmt und damit der Raumwinkel der Quelle Mond  $\Omega_m$  (solid source angle) ausgedrückt in Quadratgrad bestimmt.

$$\Omega_m = \pi \cdot \left(\frac{\Phi}{2}\right)^2 \quad (17)$$

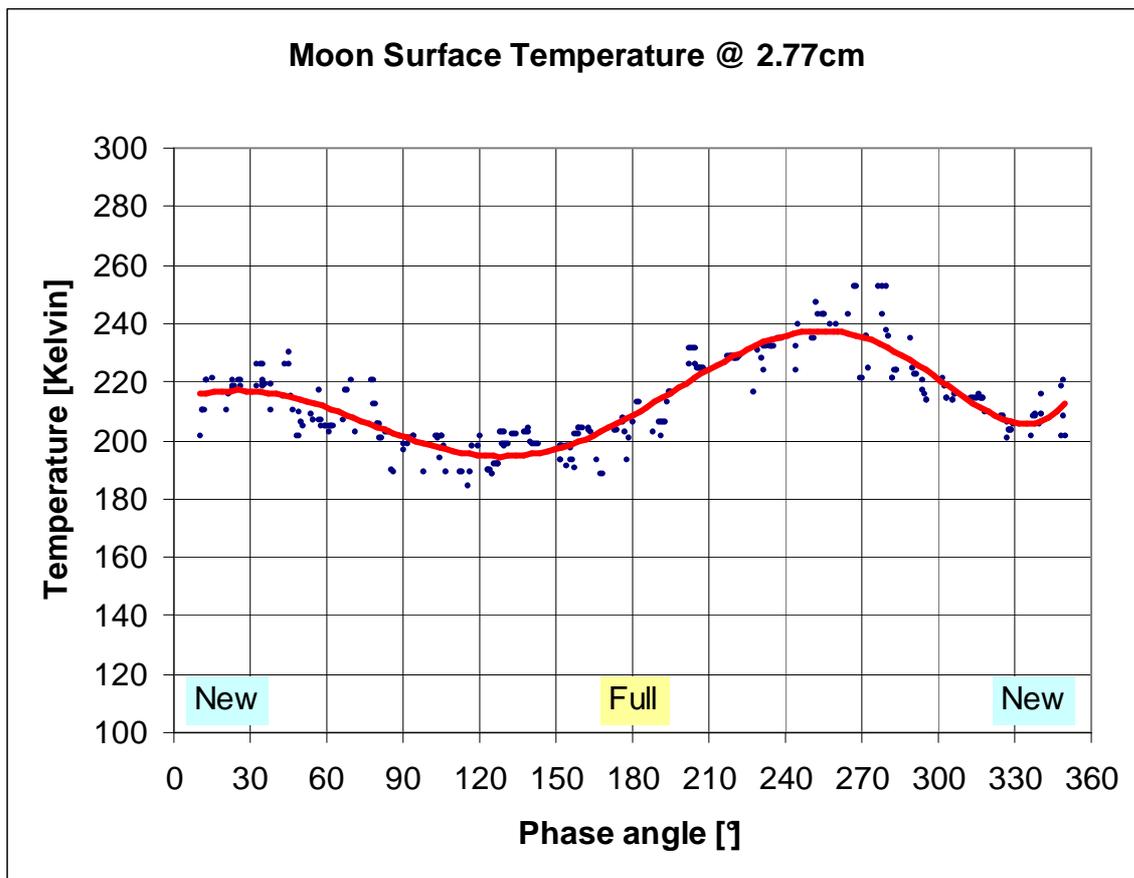
Alle Teilkomponenten (1) bis und mit (7) sind nun bekannt und erlauben es nun endlich die Mondtemperatur  $T_m$  zu bestimmen als Funktion von Antennentemperatur, Systemtemperatur, Elevation, Verlusten, Öffnungswinkel etc.

$$T_m = T_p \cdot \frac{\Omega_a}{\Omega_m} \quad (18)$$

$T_m$  (18) ist die Helligkeitstemperatur der Mondscheibe bei 2.77cm Wellenlänge gemittelt über die gesamte Mondscheibe. Sie wird im Text fortan als Scheibentemperatur benannt.

#### 4. Resultat

Nach all der mühsamen Rechnerei (1) bis (18) sind wir nun in der Lage einen Graphen zu produzieren, welcher die Mondtemperatur  $T_m$  als Funktion des Mondphasewinkels  $\phi$  zeigt. Die dunklen Punkte zeigen die gemessenen Stundenwerte, während die dicke durchgezogene Linie einen Polynom-Fit 6ten Grades durch alle Datenpunkte zeigt. Das Polynomfilter entfernt das restliche Rauschen in den Messpunkten und glättet das Ergebnis etwas. Die Streuung  $1\sigma$  ist kleiner als 10 Kelvin ( $1\sigma < 4\%$  der mittleren Scheibentemperatur) während der Mittelwert etwa 213 Kelvin beträgt. Es lässt sich sehr leicht die zeitliche Verschiebung der Maximumtemperatur von etwa 236 Kelvin bei circa 5 Tagen nach Vollmond erkennen. Ebenfalls erkennt man, dass die Minimumtemperatur von etwa 192 Kelvin 2 Tage vor Vollmond stattfindet.



**Fig. 5:** Scheibentemperatur des Mondes bei 2.77cm Wellenlänge gegenüber dem Mondphasenwinkel  $\phi$  zwischen 6.1.2001 und 8.3.2001. Die Mondfinsternis vom 9.1.2001 hatte keinen messbaren Einfluss auf das Ergebnis, da im Radiobereich die Strahlung kurzfristig nicht variiert..

#### 5. Zusammenfassung

Es kann gezeigt werden, dass es möglich ist, klassische astronomische Experimente [8] mit ziemlich einfacher und billiger Hardware nachzuvollziehen. Heutige Satelliten-LNC's zeigen eine so tiefe Systemtemperatur, dass es sogar möglich sein sollte andere Planeten aus unserem

Sonnensystem nachzuweisen. Vorausgesetzt, man benutzt passende Methoden und Parameter wie hohe Integrationszeit und hohe Messbandbreite. Im vorliegenden Experiment wurden noch nicht alle Optionen voll ausgeschöpft, als erste Ergebnis bin ich trotzdem zufrieden. Eine plausible Erklärung für die vergleichsweise hohe zeitliche Verschiebung des Maximums liegt wohl in der von mir grösser gewählten Wellenlänge gegenüber Dicke und Beringer bei 1.25cm. Es ist vermutlich so, dass die grösseren Wellenlängen tiefer in den Mondstaub eindringen, diesen aufheizen und dieser die Strahlung entsprechend verzögert wieder abstrahlt. Die Messmethode könnte weiter verbessert werden, indem mit einer stabilen und kalibrierten Rauschquelle die Anlage periodisch überprüft wird um die systematischen Fehler zu reduzieren. Ein richtiger Integrator, höhere Messbandbreite und eine etwas höher Samplingrate würde helfen die statistischen Fehler weiter zu reduzieren. Es wäre interessant zu sehen, wenn andere Amateure diese Messungen wiederholen würden möglichst auf verschiedenen Frequenzen um herauszufinden wie das Wellenlängenabhängige Verhalten des Mondstaubes tatsächlich ist. Vor Apollo 11 wurden alle diese Messungen mit professionellen Mitteln bereits durchgeführt, aber für Amateure lohnt es sich trotzdem damit zu experimentieren. Die neuesten Publikation veröffentlicht durch Jaime Alvarez-Muñiz und Enrique Zas [9] zeigen, dass der Mond wieder interessant wird im Zusammenhang mit kosmischen Strahlen und Neutrinos. Die beiden Autoren wollen die Mondmasse als extrem grossen Teilchendetektor verwenden und mit terrestrischen Radioteleskopen die Cherenkov-Strahlung versuchen nachzuweisen.

**Verdankungen.** Hiermit danke ich Michael Arnold vom Astronomischen Institut, Gruppe für Plasma und Astrophysik für die Erweiterung der Antennenkontrollsoftware durch die Methode "on/off-source". Elektrischer Strom, Beobachtungszeit und einige Netzwerkbandbreite wurden grosszügigerweise zur Verfügung gestellt durch das Astronomische Institut der ETH Zürich.

## Referenzen

- [1] Dicke, R. H. and Beringer, R., 'Microwave radiation from the sun and the moon', *Astrophys. J.* 103, 375
- [2] Piddington, J. H. and Minnett, H. C., 'Microwave thermal radiation from the moon', *Aust. J. Sci. Res. A2*, 63.
- [3] John D. Kraus, *Radio Astronomy*, McGraw -Hill Book Company, New York 1966, ISBN 07-035392-1
- [4] J. S. Hey, *Das Radiouniversum, Einführung in die Radioastronomie*, Verlag Chemie, Weinheim 1974, ISBN 3-527-25563-X
- [5] J. S. Hey, *The Evolution of Radio Astronomy*, Elek Science, London 1973, isbn 236-15453-2
- [6] Astronomisches Institut ETH Zürich, Scheuchzerstrasse 7, CH-8092 Zürich, <http://www.astro.phys.ethz.ch/rapp/>
- [7] Schönberg E. (1929): *Theoretische Photometrie*, Handbuch der Astrophysik Bd. II/1 ed. by K. F. Bottlinger et al. (Springer Berlin)

[8] Woodruff, Turner, Sullivan: Classics in Radio Astronomy, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht Holland 1982, isbn 90-277-1356-1

[9] Jaime Alvarez-Muñiz, Enrique Zas: Prospects for radio detection of extremely high energy cosmic rays and neutrinos in the moon. New Scientist (Nr. 2280, p.7) 3 March 2001. More at: <http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0102173>

<b>Privatadresse:</b>	<b>Geschäftsadresse:</b>
Christian Monstein Dipl. Ing. (FH) Wiesenstrasse 13 8807 Freienbach  <a href="http://www.monstein.de">http://www.monstein.de</a>  <a href="mailto:cmonstein@swissonline.ch">cmonstein@swissonline.ch</a>	Christian Monstein Astronomisches Institut ETHZ Scheuchzerstrasse 7 8092 Zürich  <a href="http://www.astro.phys.ethz.ch">http://www.astro.phys.ethz.ch</a>  <a href="mailto:monstein@astro.phys.ethz.ch">monstein@astro.phys.ethz.ch</a>