

### 1. Messung bei 10 GHz (2004)

Man kann die Radiostrahlung der Sonne mit einfachen Mitteln nachweisen, beispielsweise mit einer für das Satelliten-Fernsehen geeigneten Antennenschüssel. Mein Versuch ergab seinerzeit (2004), dass man durch Vergleich mit dem Rauschpegel bekannter Strahlungsquellen sogar die Temperatur der der Radiosonne abschätzen kann<sup>1</sup>. Ich benutzte eine handelsübliche Parabolantenne von 70 cm Durchmesser, einen (low noise-)Konverter (*LNC*) für 10 GHz und einen *HF*-Pegelmesser, der zum Ausrichten von Satelliten-Antennen benutzt wird (»Satfinder«). Ein Experiment dieser Art wurde von Lo und Lonc beschrieben<sup>2</sup>, es ergab für eine Frequenz von 4 GHz eine Temperatur von etwa  $29 \cdot 10^3$  K. Mein Experiment war im Wesentlichen eine Kopie ihrer Arbeit. Ich erhielt bei 10 GHz eine Temperatur von  $11 \cdot 10^3$  K mit einem Fehler von etwa 10%. Abbildungen 1 und 2 zeigen die damals verwendete Messanordnung.



Abbildung 1 Messaufbau 2004 (10 GHz): Parabolantenne, Stromversorgung (unter dem Klapptisch), Datenlogger und PC



Abbildung 2 Messaufbau 2004 (10 GHz), Details: Parabolantenne mit LNC und Satfinder. Parallaxische Montierung

Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 3 dargestellt. Sie zeigt den vom Satfinder gemessenen Rauschpegel beim Durchgang der Sonne durch den Parabolspiegel und beim Richten auf eine (abgeschattete) Hauswand. Die Strahlung der Hauswand diente zur Kalibrierung des Empfängers ( $T = 300 \text{ K}$ ).

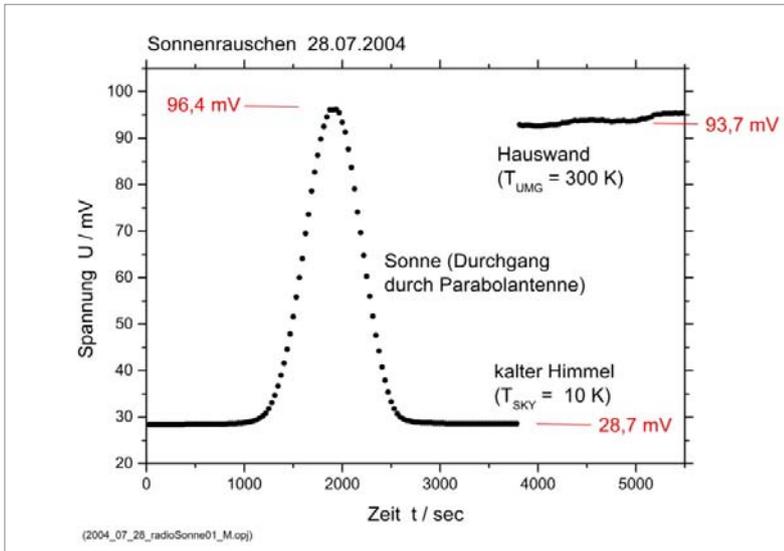


Abbildung 3 Ergebnis der Messung 2004: Vom Satfinder angezeigter Rauschpegel beim Durchgang der Sonne durch die Empfangskeule des Parabolspiegels und beim Richten der Parabolantenne auf eine abgeschattete Hauswand (Kalibrierung)

Die damals bestimmte Sonnentemperatur betrug, wie gesagt,  $T = (11 \pm 10) \cdot 10^3 \text{ K}$ , ein durchaus plausibler Wert.

## 2. Messung bei 625 MHz (1991)

Ich hatte schon 1991, vor den Experimenten mit der Satellitenantenne, versucht, die Radiostrahlung der Sonne mit einer Rundfunk-Antenne im *UHV*-Bereich nachzuweisen. Die Anordnung bestand aus einer 23-Element-Yagi mit einem Gitter als Reflektor, einem rauscharmen GaAs-Vorverstärker und einem kommerziellen Pegelempfänger (Gebrauchtgerät), abgestimmt auf eine Frequenz von ca. 625 MHz. Abbildung 4 zeigt die Antenne und den angeschlossenen Pegelmesser.



Abbildung 4 Messapparatur 1991 (625 MHz): 23-Element-Yagi-Antenne (parallaktisch montiert) und Pegelmessgerät (Gebrauchtgerät Type USVD BN 1523, Rohde & Schwarz, München)



### 3. Etwas Theorie

Die 1991er-Daten sind in der Tat nicht sehr aussagekräftig. Sie sollten aber zumindest eine Abschätzung der Sonnentemperatur bei 625 MHz erlauben. Das schien mir der Mühe wert. Ich nahm das zum Anlass, auch die 2004er-Daten (10 GHz) nochmals auszuwerten.

Bei der Auswertung der 10 GHz-Daten (2004) machte ich Gebrauch davon, dass die Signalpegel der Sonnenstrahlung und der Strahlung aus der Umgebung nahezu gleich groß waren. In Abbildung 4 sind es die rot markierten Spannungen  $U_{SUN} = 96,4$  mV (Sonne) und  $U_{300K} = 93,7$  mV (Hauswand). Wegen der fast gleichen Werte hob sich die Kalibrierung des HF-Pegelmessers (Satfinder) im Vergleich der beiden Größen weg. Das machte die (näherungsweise) Bestimmung der Sonnentemperatur einfach.

In der nachfolgenden neuen Auswertung kalibrierte ich die Anzeige des HF-Pegelmessers in der üblichen Weise, also mit Hilfe von Eichmarken. Es stehen mir allerdings nur zwei dieser Eich-Temperaturen zur Verfügung: die Umgebungstemperatur 300 K (Hauswand) und die Temperatur des kalten Himmels, für die ich den Wert 10 K annehme. Ich setze nun voraus, dass Pegelanzeige und Rauschleistung (und damit Temperatur) linear voneinander abhängen. Das ist plausibel, da man annehmen kann, dass der HF-Detektor eine quadratische Kennlinie hat. Gleichrichtung und Integration des Rauschsignals sollten daher eine Anzeige proportional zum *rms*-Wert der HF-Spannung und damit proportional zur Rauschleistung liefern. Ich setze also voraus, dass Pegelanzeige  $U$  und Rauschleistung (Temperatur  $T$ ) miteinander verknüpft sind durch

$$(1) \quad T(U) = aU + b,$$

wobei  $a$  und  $b$  aus den gemessenen Wertepaaren von  $U$  und  $T$  zu bestimmen sind. Mehr dazu weiter unten.

Zum Verständnis der weiteren Auswertung ist zu bemerken, dass die hier mit  $T$  bezeichnete Temperatur die durch das *Rayleigh-Jeans*'sche Gesetz definierte Äquivalent-Temperatur  $T_B$  bedeutet. Besser wäre die englische Bezeichnung »brightness temperature«. Das *Rayleigh-Jeans*'sche Gesetz lautet

$$(2) \quad B(f) = \frac{2kf^2T_B}{c^2}.$$

Dabei bedeutet  $B$  die Intensität der Strahlungsquelle,  $k$  die Boltzmann-Konstante ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K) und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s).  $B$  (oft auch mit  $I$  bezeichnet, engl. »intensity« oder »surface brightness«) ist die in einen Strahlungsdetektor einfallende Leistung pro Fläche, pro Frequenzintervall und pro Raumwinkelelement, hat also die Einheit Watt/(m<sup>2</sup> Hz sr), wobei sr die Abkürzung für die Raumwinkeleinheit *Steradian* ist. Gleichung (2) gilt unabhängig davon, ob die Quelle ein thermischer Strahler ist oder nicht. Das heißt, die brightness temperature  $T_B$  einer Quelle der Intensität  $B$  ist definiert als die Temperatur eines Schwarzen Körpers mit derselben Intensität wie die der Quelle (bei gegebener Frequenz).

Außerdem ist die vorhin Rauschleistung genannte Größe genau genommen die Flussdichte der Strahlung, die die Antenne trifft, multipliziert mit der Antennenfläche und der Bandbreite des HF-Empfängers. Die Flussdichte  $S$  (engl. »flux density«) wiederum ist das Produkt aus der Intensität  $B$  der Quelle und dem Raumwinkel  $\Omega$ , unter dem die Antenne die Strahlungsquelle sieht:

$$(3) \quad S = \frac{2kf^2T_B}{c^2} \Omega.$$

Damit ist bei gegebener Frequenz die Flussdichte proportional zum Produkt aus Äquivalent-Temperatur  $T_B$  und Raumwinkel  $\Omega$ , also  $S \propto T_B \Omega$ . Das Produkt  $T_B \Omega$  spielt im nachfolgenden Abschnitt eine Rolle.

Bei der Messung der Sonnentemperatur richtet man die Antenne auf die Sonne, die unter dem Raumwinkel  $\Omega_{SUN}$  erscheint. Da der Raumwinkel der Antennen-Empfangskeule  $\Omega_{ANT}$  größer ist als der der Sonne, empfängt man nicht nur die Strahlung der Sonne, sondern auch die des Himmels in der Umgebung der Sonne. Die Äquivalent-Temperaturen (brightness temperatures) von Sonne und Himmelshintergrund seien mit  $T_{SUN}$  bzw.  $T_{SKY}$  bezeichnet, und die Temperatur der (gesamten) von der Antenne empfangenen Strahlung werde  $T_{ANT}$  genannt. Multipliziert man diese Temperaturen mit den entsprechenden Raumwinkeln, aus denen die Strahlung jeweils empfangen wird, erhält man bis auf konstante Faktoren die zugehörigen Flussdichten  $S$ . Da sich Flussdichten addieren, ist die von der Antenne registrierte Flussdichte gleich der Summe der Flussdichten von Sonne und Himmelshintergrund. Es gilt also

$$(4) \quad T_{ANT} \Omega_{ANT} = T_{SUN} \Omega_{SUN} + T_{SKY} (\Omega_{ANT} - \Omega_{SUN}) .$$

Dabei wurde auf der rechten Seite der Gleichung im Term des Himmelshintergrunds (Temperatur  $T_{SKY}$ ) der Antennen-Raumwinkel  $\Omega_{ANT}$  um den Raumwinkel  $\Omega_{SUN}$  der Sonne vermindert – von der Sonne geht natürlich keine Hintergrundstrahlung aus.

Gleichung (4) zeigt, dass sich bei Kenntnis der Raumwinkel  $\Omega_{SUN}$  und  $\Omega_{ANT}$  aus der Messung der Antennentemperatur  $T_{ANT}$  die Temperatur  $T_{SUN}$  der Sonne ermitteln lässt.  $T_{SKY}$  ist die Temperatur des kalten Himmels, sie beträgt etwa 10 K. Da Antennen- und Sonnentemperatur wesentlich größer sind als die Temperatur des kalten Himmels, ist der genaue Wert von  $T_{SKY}$  unerheblich. Man erhält

$$(5) \quad T_{SUN} = (T_{ANT} - T_{SKY}) \cdot \frac{\Omega_{ANT}}{\Omega_{SUN}} + T_{SKY} .$$

Wegen  $T_{SKY} \ll T_{ANT}$  kann man auch

$$(6) \quad T_{SUN} \cong T_{ANT} \cdot \frac{\Omega_{ANT}}{\Omega_{SUN}}$$

für eine grobe Abschätzung benutzen.

Nach diesem Ausflug in die Theorie zurück zum Messverfahren für die Temperatur. Es geht um die Bestimmung der Antennen-Temperatur  $T_{ANT}$  aus dem vom Detektor gelieferten  $HF$ -Pegelwert  $U_{ANT}$ . Dazu benötigt man die Pegelwerte  $U_{300K}$  und  $U_{10K}$ , die den Eichtemperaturen  $T_{300K} = 300$  K (Hauswand) beziehungsweise  $T_{10K} = 10$  K (kalter Himmel) entsprechen. Man setzt die Wertepaare  $(U_{300K}/T_{300K})$  und  $(U_{10K}/T_{10K})$  in Gleichung (1) ein und erhält ein lineares Gleichungssystem für die Koeffizienten  $a$  und  $b$ , die in der üblichen Weise bestimmt werden. Das Ergebnis ist

$$(7) \quad T_{ANT} = \frac{T_{300K} - T_{10K}}{U_{300K} - U_{10K}} \cdot (U_{ANT} - U_{300K}) + T_{300K} .$$

Da die Temperatur  $T_{10K}$  klein ist gegenüber  $T_{300K}$ , gilt näherungsweise

$$(8) \quad T_{ANT} \cong \frac{T_{300K}}{U_{300K}} \cdot U_{ANT} .$$

Setzt man diese Näherung in die ebenfalls genäherte Gleichung (6) ein, erhält man die Abschätzung

$$(9) \quad T_{SUN} \cong \frac{U_{ANT}}{U_{300K}} \cdot \frac{\Omega_{ANT}}{\Omega_{SUN}} \cdot 300K ,$$

die beispielsweise Lo und Lonc in ihrer Arbeit<sup>2</sup> verwenden.

#### 4. (Neu-)Auswertung der Messung 2004

Für die Kalibrierung des Pegelmessers benutze ich die Temperaturen der Hauswand (300 K) und die des kalten Himmels (10 K). Sie liefern die in Abbildung 3 angegebenen Spannungswerte  $U_{300K} = 93,7$  mV (Hauswand) und  $U_{10K} = 28,7$  mV (kalter Himmel). Setzt man die Wertepaare  $(93,7$  mV/300 K) und  $(28,7$  mV/10 K) in Gleichung (7) ein, erhält man

$$T_{ANT} = \frac{300 - 10}{93,7 - 28,5} \frac{K}{mV} \cdot (U_{ANT} - 93,7 mV) + 300 K$$

$$= 4,448 \frac{U_{ANT}}{mV} K - 116,8 K$$

Die Antennentemperatur entspricht der *rms*-Rauschspannung im Maximum der glockenförmigen Kurve des Sonnendurchgangs, also  $U_{ANT} = 96,4 mV$ . Damit ist  $T_{ANT} = T_{ANT}(96,4 mV) = 312,0 K$ . Die Näherungsformel Gleichung (8) ergäbe  $T_{ANT} = 308,6 K$ .

Der Raumwinkel  $\Omega_{ANT}$ , aus dem die Antenne Strahlung empfängt, ergibt sich aus der Fläche unter der Kurve des Sonnendurchgangs. Eine numerische Integration liefert die Winkelbreite des Rechtecks mit derselben Höhe wie die glockenförmige Kurve, sie ergibt  $2,90^\circ$ . Die Antennenschüssel war leicht elliptisch geformt, und die in Abb. 3 gezeigte Kurve ergab sich beim Durchgang der Sonne entlang der kleinen Halbachse. Das Verhältnis der Längen von großer und kleiner Halbachse war  $76 cm/66 cm = 1,15$ , so dass der Öffnungswinkel entlang der großen Halbachse  $2,90^\circ \cdot 1,15 = 3,33^\circ$  betrug. Daraus folgt als Raumwinkel der Antenne  $\Omega_{ANT} = \pi(2,90^\circ/2) \cdot (3,33^\circ/2) \cdot (\pi/180)^\circ = 2,31 \cdot 10^{-3} sr$  (Steradian).

Der Raumwinkel  $\Omega_{SUN}$ , unter dem die Sonnenscheibe erscheint, ergibt sich aus ihrem Winkeldurchmesser von  $0,533^\circ$ . Er ist  $\Omega_{SUN} = \pi(0,533^\circ/2)^\circ = \pi(0,2665^\circ \pi/180^\circ)^\circ = 6,80 \cdot 10^{-5} sr$ .

Setzt man schließlich  $T_{ANT}$ ,  $T_{SKY}$ ,  $\Omega_{ANT}$  und  $\Omega_{SUN}$  in Gleichung (5) ein, folgt

$$T_{SUN} = (312,0 K - 10 K) \cdot \frac{2,31 \cdot 10^{-3} sr}{6,80 \cdot 10^{-5} sr} + 10 K = 10269 K$$

Nimmt man für die Temperatur des kalten Himmels an  $T_{SKY} = 20 K$ , wird Gleichung (7) zu  $T_{ANT} = 4,2945 \cdot (U_{ANT}/mV) K - 102,4 K$  und die Antennentemperatur zu  $T_{ANT} = 311,6 K$ . Daraus ergibt sich nach Gleichung (5) als Sonnentemperatur  $T_{SUN} = 9926 K$ .

Der Mittelwert beider Temperaturen ist  $10097 K$ . Als Messfehler wurde bei der ersten Auswertung  $\pm 10\%$  angegeben. Mit dieser Fehlerabschätzung lautet das Endergebnis

$$T_{SUN} = (10,1 \pm 1,0) \cdot 10^3 K \quad (\text{bei } 10 GHz).$$

Nach der Näherungsformel Gleichung (9) hätte man  $T_{SUN} = 10,5 \cdot 10^3 K$  erhalten. Der Unterschied zu  $10,1 \cdot 10^3 K$  geht also im Messfehler unter. Der Wert  $T_{SUN} = (10,1 \pm 1,0) \cdot 10^3 K$  stimmt im Übrigen innerhalb der Fehlergrenzen überein mit dem damaligen (2004) Ergebnis  $T_{SUN} = 11 \cdot 10^3 K$ .

## 5. Auswertung der Messung 1991 (Abschätzung der Sonnentemperatur)

Die Yagi-Antenne der Apparatur 1991 wurde, wie gesagt, nicht auf eine Hauswand oder ein ähnliches Objekt gerichtet, so dass der Pegelwert für  $300 K$  fehlt. Abbildung 5 zeigt aber, dass die Messpunkte am rechten Rand gegen einen Wert im Bereich von etwa  $0,8 V$  bis  $1,1 V$  streben. Ich halte daher einen Wert  $U_{300K} = 0,95 \pm 0,15 V$  für plausibel. Die Eichmarke für  $10 K$  (kalter Himmel) ist vergleichsweise eindeutig, die Abbildung zeigt  $U_{10K} = 0,35 V$ . Setzt man die Wertepaare  $(0,95 \pm 0,15 V / 300 K)$  und  $(0,35 V / 10 K)$  in Gleichung (7) ein, folgt

$$T_{ANT} = 483 \frac{U_{ANT}}{V} K - 159 K$$

Der Maximalwert der Sonnen-Durchgangskurve ist hier  $U_{ANT} = 1,0 V$ , so dass für  $U_{300K} = 0,95 V$  die Antennentemperatur  $T_{ANT} = 279 K$  wird. Für die beiden Randwerte des Fehlerbereichs von  $U_{300K}$  ( $0,8 V$  und  $1,1 V$ ) erhält man  $T_{ANT} = 428 K$  beziehungsweise  $T_{ANT} = 261 K$ .

Da es sich hier nur um eine *Abschätzung* handelt, nehme ich eine Antennentemperatur  $T_{ANT} = 280 K$  an, und zwar mit einem Fehler von  $\pm 100 K$ .

Die Halbwertsbreite der Kurve des Sonnendurchgangs ergibt sich aus Abbildung 6. Der Mittelwert beider Messungen ist  $23^\circ \pm 2^\circ$ . Daraus folgt als Raumwinkel der Antenne  $\Omega_{ANT} = \pi(23^\circ/2)^2 \cdot (\pi/180)^2 = 0,1266 \text{ sr}$  (Steradian). Mit dem Raumwinkel der Sonne  $\Omega_{SUN} = 6,80 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$  (siehe oben) ergibt sich dann nach Gleichung (7)

$$T_{SUN} = (280 \text{ K} - 10 \text{ K}) \cdot \frac{0,1266 \text{ sr}}{6,80 \cdot 10^{-5} \text{ sr}} + 10 \text{ K} = 503000 \text{ K} .$$

Für  $T_{ANT} = (280 + 100) \text{ K}$  wird  $T_{SUN} = 689000 \text{ K}$ , für  $T_{ANT} = (280 - 100) \text{ K}$  folgt  $317000 \text{ K}$ . Also ist mein Ergebnis, sinnvoll gerundet:  $T_{SUN} = (500 \pm 200) \cdot 10^3 \text{ K}$  (bei 625 MHz).

## 6. Ergebnis

Abbildung 7 zeigt einige der Literatur<sup>3</sup> entnommene Messpunkte der Sonnen-Äquivalenttemperatur (schwarze Kreise), aufgetragen als Funktion der Frequenz. Die beiden hier ermittelten bzw. abgeschätzten Temperaturen bei 10 GHz und 625 MHz sind durch rote Kreise mit Fehlerbalken

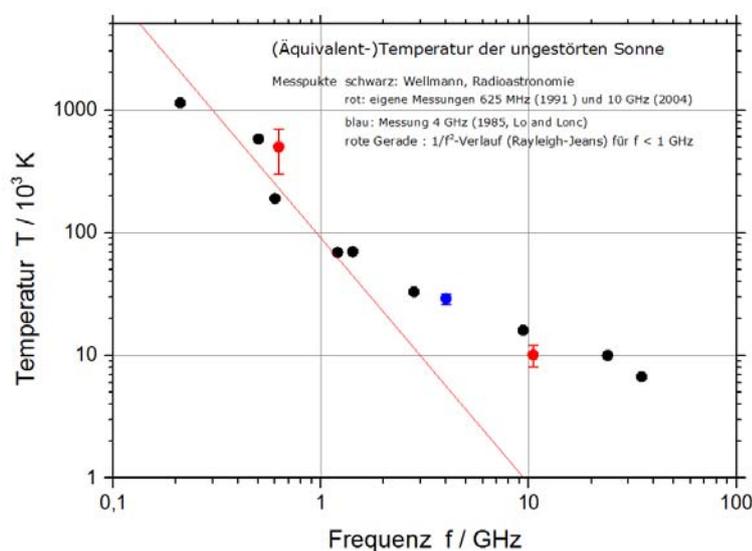


Abbildung 7 Äquivalent-Temperatur (brightness temperature)  $T$  der Sonne als Funktion der Frequenz  $f$ . Die schwarzen Punkte wurden dem Buch von Wellmann<sup>3</sup> entnommen, die beiden roten Punkte sind das Ergebnis meiner Messung bei 10 GHz und der Abschätzung für 625 MHz. Der blaue Punkt bei 4 MHz ist das Messergebnis von Lo und Lonc<sup>2</sup>.

gekennzeichnet. An die Punkte unterhalb 1 GHz wurde eine Gerade angepasst, die den  $1/f^2$ -Verlauf nach *Rayleigh-Jeans* darstellt. Obwohl meine Messungen im Grunde genommen Abschätzungen sind, fügen sich die roten Punkte in den Verlauf der professionellen Daten ein. Oberhalb von 1 GHz zeigt sich die Abweichung vom  $1/f^2$ -Verhalten des *Rayleigh-Jeans*'schen Gesetzes.

## 7. Literatur und Anmerkungen

<sup>1</sup> H. Th.: *Temperatur der Sonne bei 10 GHz*, <http://www.horstth.de>

<sup>2</sup> George Lo, William P. Lonc: *Solar temperature at 4 GHz: An undergraduate experiment*, Am. J. Phys. 54 (9), S.843

<sup>3</sup> Peter Wellmann: *Radioastronomie*, Dulp Taschenbücher, Band 340, Lehnen Verlag, München (1957)