

1. Einleitung

Richtet man eine Satellitenschüssel auf die Sonne, erhöht sich der Rauschpegel am Ausgang des Antennenkonverters (*LNC*, *low noise converter*) bezogen auf den Wert, den man normalerweise misst („normalerweise“ bedeutet zum Beispiel, dass die Antennenschüssel auf eine Himmelsregion fernab von der Sonne gerichtet wird). Mit diesem „Experiment“ zeigt man, dass die Sonne nicht nur sichtbares Licht, sondern auch Radiostrahlung aussendet. Da das Experiment keinen großen Aufwand an Geräten erfordert, erscheint es interessant zu untersuchen, ob es auch quantitativ auswertbar ist. Dazu muss man den Rauschpegel messen oder zumindest mit dem eines Körpers bekannter Temperatur vergleichen. Bei der vorliegenden Messung stellte sich heraus, dass dieser Vergleich per Zufall unabhängig von der Eichung des Pegelmessers war.

Experimente dieser Art sind nicht neu, sie sind z. B. Bestandteil des physikalischen Praktikums an Hochschulen. Für das vorliegende Experiment habe ich nur solche Geräte verwandt, die man auch für das Satelliten-Fernsehen benötigt: eine Antennenschüssel von etwa 70 cm Durchmesser, einen *LNC* für 10 GHz und einen *HF*-Pegelmesser, der zum Ausrichten von Satelliten-Antennen verwandt wird (*Satfinder*). Ein Experiment dieser Art wird z. B. von *Lo* und *Lonc* [LoL 85] beschrieben.

2. Theorie

Die Radiostrahlung der Sonne vergleicht man in der Regel mit der Strahlung, die aus der Öffnung eines Hohlraums austritt, wenn man diesen auf die Temperatur T aufheizt (T gemessen vom absoluten Nullpunkt aus). Die Intensität B der Hohlraumstrahlung ist für kleine Frequenzen f (dazu gehören die Radiofrequenzen) proportional zur Temperatur T . In diesem Bereich von Frequenzen gilt das Gesetz von *Rayleigh-Jeans*

$$(1) \quad B(f) = \frac{2kTf^2}{c^2} .$$

Dabei ist k die *Boltzmann-Konstante* ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}^1$) und c die Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). B gibt die einfallende Leistung pro Fläche, pro Frequenzintervall und pro Raumwinkel an, hat also die Einheit $\text{Watt}/(\text{m}^2 \text{ Hz sr})$, wobei sr die Abkürzung für die Raumwinkeleinheit *Steradian* ist. Kleine Frequenzen bedeuten, dass die Ungleichung $hf/kT \ll 1$ erfüllt ist (h ist die *Plancksche Konstante*).

Lässt man Licht in die (kleine) Öffnung des vorhin beschriebenen Hohlraums hineintreten, so wird dieses durch Reflexionen im Innern des Hohlraums nahezu vollständig absorbiert. Die Öffnung erscheint daher, von außen betrachtet, völlig schwarz. Daher heißt dieser Hohlraum auch „Schwarzer Körper“ und die von ihm ausgehende Strahlung auch „Schwarzkörperstrahlung“.

Es hat sich nun eingebürgert, dass man astronomischen Strahlungsquellen, auch wenn sie keine idealen Schwarzen Körper sind, nach Gl. (1) eine Temperatur zuordnet. Das heißt, ihre Intensität B mithilfe dieser Gleichung in eine Temperatur T umrechnet. Diese Temperatur heißt dann „Äquivalente Schwarzkörper-Temperatur“ (vielfach aber auch nur kurz „Temperatur“). Da sie proportional zu B ist, wird sie bei der Diskussion von Strahlungsintensitäten in der Regel anstelle der Intensität verwandt.

Um die Strahlungsintensität B (und damit T) nach Gl. (1) zu bestimmen, müssen die empfangene Strahlungsleistung, die Bandbreite des Empfängers und der Raumwinkel der Antenne gemessen werden. Bandbreite und Raumwinkel sind schwierig zu bestimmen. Man kann auf ihre Messung

verzichten, wenn die Strahlungsleistung der Sonne *relativ* zu der eines Körpers bekannter Temperatur bestimmt wird. Dieses Messverfahren soll hier angewandt werden. Als Körper mit bekannter Temperatur bietet sich der Erdboden oder die Wand eines Hauses an, deren Temperatur an einem Sommertag in etwa 300 K beträgt.

3. Messanordnung

Ein Blockschaltbild der Messanordnung zeigt Abb. 1. Die elektrische Energie, die pro Zeiteinheit von der Antenne innerhalb der Bandbreite des Systems empfangen wird, gelangt über den einen LNC (A) zum Detektor (B) und wird an dessen Ausgang mit einem Voltmeter (C) gemessen. Zur Aufzeichnung der Messwerte dient ein Rechner. Abbildung 2 zeigt den Messaufbau.

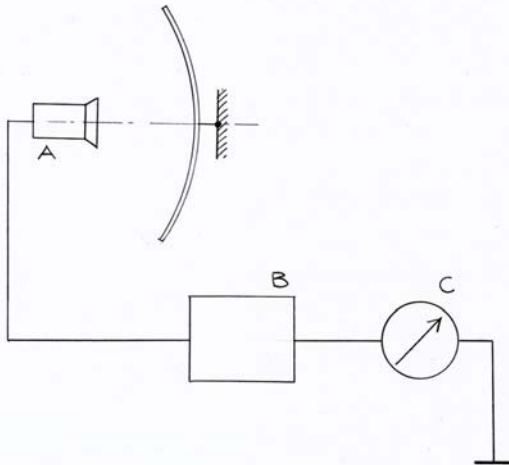


Abb. 1 Messanordnung LNC (A), Detektor (B) und Voltmeter (C)

Das Signal, das vom LNC dem Detektor angeboten wird, enthält nicht nur das Sonnenrauschen, sondern auch einen Anteil, der von anderen astronomischen Quellen stammt. Dieser Anteil soll hier als Beitrag des „kalten“ Himmels bezeichnet werden. Eine weitere, nicht astronomische Rauschquelle ist die Eingangsstufe unseres Empfängersystems. Deren Rauschen wird im LNC zusammen mit den beiden anderen „Signalen“ verstärkt und gelangt so in den Detektor.

Die elektrische Leistung P , die vom LNC dem Detektor angeboten wird, enthält damit drei Anteile: Zunächst die Leistung, die von der Sonne herrührt (P_{SONNE}), dann die Rauschleistung, die der kalte Himmel verursacht (P_{KALT}), und schließlich die Leistung des Empfängerrauschens (P_{RX})¹. Es gilt also (siehe auch [LoL 85])

$$(2) \quad P = P_{SONNE} + P_{KALT} + P_{RX} .$$

Der Detektor, der sich im HF-Pegelmesser (*Satfinder*) befindetet, besteht im Wesentlichen aus einer Diode und einem nachgeschaltetem Tiefpass. Wir setzen voraus, dass die Diode eine quadratische Kennlinie besitzt, so dass ihr Strom in Durchlassrichtung proportional zur HF-Leistung des gleichgerichteten Rauschsignals ist. Das heißt, die am Ausgangswiderstand anliegende Spannung ist proportional zum zeitlichen Mittelwert des Quadrats der Detektor-Eingangsspannung und damit proportional zu P . Diese Spannung wird von einem Zeigerinstrument angezeigt. Parallel zu diesem Gerät war ein (Digital-)Voltmeter geschaltet, dessen Anzeige von einem Rechner ausgelesen wurde.

Gleichung (2) gibt die Rauschenergie pro Zeitintervall an, die von der Antenne empfangen wird, wenn sie direkt auf die Sonne ausgerichtet ist. Bei der Vergleichsmessung



Abb. 2 Parallaxische Montierung der Antennenschüssel

wurde die Antenne auf eine (mit Laub bewachsene) Hauswand gerichtet, die nicht von der Sonne angestrahlt wurde. Sonnenrauschen durch direkte Reflexion drang deshalb nicht in die Antenne. Außerdem war die Hauswand so groß, dass sie ganz im Gesichtsfeld der Antenne lag. Das heißt, es wurde mit der Antennenschüssel ein ausgedehntes Objekt „betrachtet“, das in guter Näherung die Umgebungstemperatur von 290 bis 300 K hatte. Die elektrische Leistung, die unter dieser Voraussetzung an den Detektor abgegeben wird, ist

$$(3) \quad P_{WAND} = P_{290K} + P_{RX} .$$

Die Messung besteht nun darin, P mit P_{WAND} als Referenz (290 K) zu vergleichen und über die Beziehung zwischen P und B die Temperatur der Sonne T_{SONNE} zu ermitteln

4. Messung

Zur Messung des Sonnenrauschens nach Gl. (2) wurde die Antennenschüssel an einer parallaktischen Fernrohrmontierung befestigt, deren Polachse (Rektaszensionsachse) in Nord-Südrichtung zeigt und gegenüber der Erdoberfläche um den Winkel 51° geneigt war. Dieser

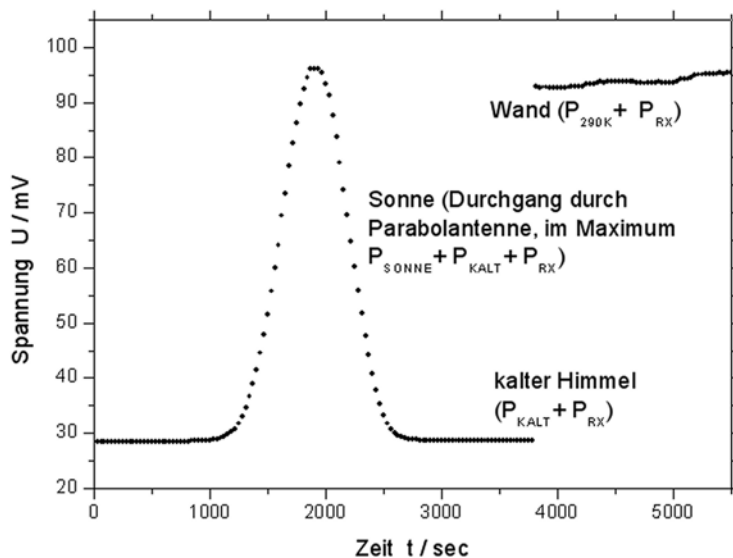


Abb. 3 Messdaten
die Spannung U ist proportional zur Strahlungsintensität

Winkel entspricht der geografischen Breite des Ortes, an dem beobachtet wurde (Mönchengladbach). Dann wurde durch Drehung um die Deklinationsachse der Montierung die Sonne angepeilt und die Achse in dieser Drehwinkelposition fixiert. Damit ist die Antenne auf die Sonne ausgerichtet. Das heißt, ihr (scheinbarer) Lauf am Himmel lässt sich jetzt nur durch Drehung um die Polachse verfolgen. Insbesondere kann man die Antenne einmalig durch Drehung um die Polachse auf eine Position *westlich* der Sonne ausrichten und dann warten, bis die Sonne wegen der Erddrehung durch das

Gesichtsfeld der Antenne hindurchgewandert ist. Die Fixierung der Deklinationsachse garantiert, dass die Sonne dabei auch durch das Maximum der Antennen-Empfangskeule hindurchgeht.

Diese Art der Beobachtung wurde hier angewandt, indem die Antenne am Anfang der Messung auf eine Himmelsposition etwa 4° westlich der Sonne ausgerichtet wurde und danach etwa eine Stunde lang die Rauschintensität aufgenommen wurde. Anschließend wurde die Antenne etwa 30 Minuten lang auf die schon erwähnte Hauswand gerichtet und deren Rauschen gemessen. Das Ergebnis zeigt Abb. 3. Aufgetragen ist die Spannung des Voltmeters hinter dem Detektor (parallel zum Anzeigeinstrument des HF-Pegelmessers) als Funktion der Beobachtungszeit. Die Sonne legt in einer Stunde einen Winkel von 15° zurück. Das heißt, 1200 Sekunden auf der Zeitachse in Abb. 3 entsprechen einem Winkel von 5° . Die glockenförmige Kurve rührt her vom Durchgang der Sonne durch die Antennenkeule, die horizontalen Abschnitte links und rechts davon stellen das Rauschen des „kalten“ Himmels dar. Rechts oben in der Grafik erkennt man die Messpunkte, die bei

Ausrichtung der Antenne auf die 300 K warme Hauswand aufgenommen wurden. Alle Signale enthalten zusätzlich das Rauschen der Eingangsstufe des LNCs.

5. Auswertung

Abbildung 3 zeigt, dass im vorliegenden Fall *zufällig* gilt $P = P_{WAND}$, zumindest innerhalb einer gewissen Näherung. Dieser Zufall macht eine quantitative Auswertung der Messung überhaupt erst möglich. Denn auf diese Art und Weise spielen Eichung und Skalenteilung des Pegelmessers (linear, logarithmisch oder anderweitig) keine Rolle. Im allgemeinen Fall müssen natürlich Eichung und Skalenteilung des Anzeigeelements bekannt sein. Aus $P = P_{WAND}$ folgt mithilfe der Gleichungen (2) und (3)

$$(4) \quad P_{SONNE} = P_{290K} - P_{KALT}.$$

Übersetzt man diese Gleichung in Strahlungsintensitäten B oder äquivalente Schwarzkörper-Temperaturen T , ist zu beachten, dass wir mit P die vom Empfänger aufgenommene (und dem Detektor zugeführte) Leistung bezeichnen. Diese Leistung hängt nicht nur von der Intensität B , sondern auch vom Raumwinkel Ω ab, unter dem das strahlende Objekt der Antenne erscheint. Das heißt, die Antenne empfängt bei Ausrichtung auf die Sonne deren Strahlung aus einem Raumwinkel, der ihrem Winkeldurchmesser von $0,5^\circ$ entspricht. Bei Ausrichtung auf die Hauswand und auf den kalten Himmel dagegen wird Strahlung aus der gesamten Empfangskeule der Antenne registriert, da Wand und Himmel ganz im Gesichtsfeld der Antennenschüssel liegen. Der entsprechende Raumwinkel ist wesentlich größer als der, unter dem die Sonne erscheint. Die Leistungen der Rauschsignale von Sonne und Wand müssen daher auf den gleichen Raumwinkel umgerechnet werden, bevor sie in äquivalente Schwarzkörper-Temperaturen umgewandelt werden. Dabei beachten wir: Die Leistung P ist das Produkt aus Strahlungsleistung (Intensität) B , Bandbreite des Empfängers und Raumwinkel Ω der Antenne. Daraus folgt, dass P proportional zu $T \cdot \Omega$ ist. Das heißt, Gl. (4) lässt sich schreiben als

$$T_{SONNE} \cdot \Omega_{SONNE} = (290K - T_{KALT}) \cdot \Omega_{ANTENNE} ,$$

so dass folgt

$$(5) \quad T_{SONNE} = (290K - T_{KALT}) \cdot \frac{\Omega_{ANTENNE}}{\Omega_{SONNE}}$$

Der Raumwinkel der Sonne ergibt sich aus ihrem Winkeldurchmesser von $0,5^\circ$ zu $\Omega_{SONNE} = \pi(0,25^\circ)^2 = \pi(0,25\pi/180)^2 = 5,98 \cdot 10^{-5}$ sr (Steradian). Der Raumwinkel $\Omega_{ANTENNE}$, der dem Gesichtsfeld der Antenne entspricht, wurde durch numerische Integration der Fläche unter der glockenförmigen Empfangskurve (Abb. 3) ermittelt. Das Ergebnis ist die Winkelbreite des flächengleichen Rechtecks mit derselben Höhe wie die glockenförmige Kurve, die Integration ergab $2,90^\circ$. 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 $76 \text{ cm}/66 \text{ cm} = 1,15$, so dass der Öffnungswinkel entlang der großen Halbachse $2,90^\circ \cdot 1,15 = 3,33^\circ$ betrug. Daraus folgt als Raumwinkel der Antenne $\Omega_{ANTENNE} = \pi(2,90^\circ/2) \cdot (3,33^\circ/2) \cdot (\pi/180)^2 = 2,31 \cdot 10^{-3}$ sr (Steradian).

Nimmt man für die Temperatur des kalten Himmels an $T_{KALT} = 6 \text{ K}$, so folgt

$$T_{SONNE} = (290 - 6) \cdot \frac{2,31 \cdot 10^{-3}}{5,98 \cdot 10^{-5}} \text{ K} = 11,0 \cdot 10^3 \text{ K} .$$

Zur Fehlerabschätzung ist zu bemerken: Der (Mess-)Fehler dieses Wertes folgt aus der Tatsache, dass die Gleichung $P = P_{WAND}$, auf der unsere Auswertung beruht, nur mit einer Genauigkeit von etwa 10% gilt und die Temperatur des kalten Himmels möglicherweise falsch abgeschätzt wurde. Der Fehler ist daher von der Größenordnung $\pm 10\%$. Als Messergebnis wird daher angegeben $T_{SONNE} = (11 \pm 1) \cdot 10^3$ K.

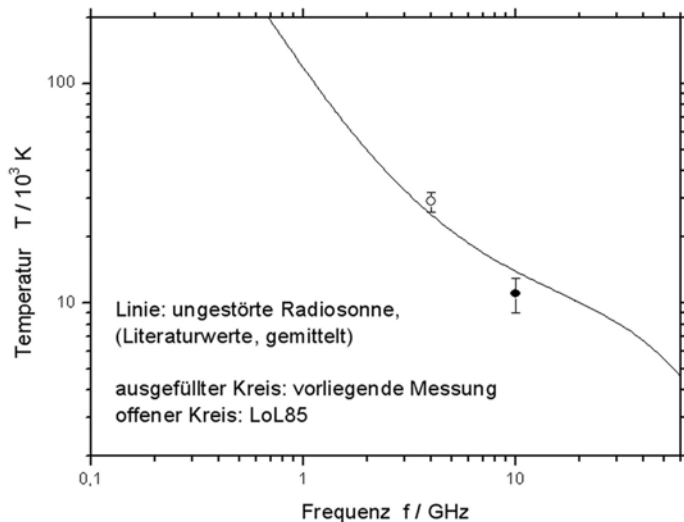


Abb. 4 Messwerte der Sonnentemperatur bei 10 GHz (vorliegende Messung) und 4 GHz [LoL85]

Dieser Wert ist größer als die Temperatur der Sonne im Bereich des sichtbaren Lichts, die 6000 K beträgt. Das deutet darauf hin, dass die Sonne nicht wie ein idealer schwarzer Körper strahlt.

Abbildung 4 zeigt, dass sich das vorliegende Messergebnis gut in die Kurve der Sonnentemperatur einfügt, die in der Literatur angegeben wird. In dieser Abbildung ist auch der Wert $T = 29 \cdot 10^3$ K eingetragen, der von Lo und Lonc [LoL 85] bei 4 GHz gemessen wurde.

Anmerkungen

¹ J ist die Abkürzung für Joule, der Einheit der Energie. 1 Joule = 1 Newton·Meter. Der Buchstabe K steht für Kelvin und ist die Einheit der absoluten Temperatur – sie wird vom absoluten Nullpunkt aus gezählt. T in der Einheit Kelvin ist gleich der Temperatur in Grad Celsius + 273.

² RX ist eine Abkürzung für *receiver* (Empfänger).

Literatur

LoL85 George Lo, William P. Lonc: Solar temperature at 4 GHz: An undergraduate experiment, Am. J. Phys. 54 (9), S.843