

Radioastronomie mit einer Satellitenschüssel

Fortgeschrittenenpraktikum im I. Physikalischen Institut der
Universität zu Köln

V. 1.4, 24. Juni 2010

1 Einleitung

Das Ziel des Versuchs *Radioastronomie mit einer Satellitenschüssel* ist die Bestimmung der Sonnentemperatur. Mit dem kleinen Radioteleskop auf dem Institutsdach wird die Strahlungsleistung der Sonne gemessen. Zur Auswertung der Messdaten und zur letztlichen Bestimmung einer physikalischen Temperatur muss das Messsystem kalibriert werden. Dieser Versuch baut auf Kenntnissen auf, die in dem Praktikumsversuch *Mikrowellenradiometer* vermittelt werden. Es wird deshalb empfohlen, die beiden Versuche in der entsprechenden Reihenfolge zu bearbeiten.

Die zur Durchführung nötigen Grundkenntnisse der Antennenphysik sowie einige Begriffe zur elektromagnetischen Strahlung müssen vorab erarbeitet werden.

2 Vorbereitung

Insbesondere sollten sie über folgende Zusammenhänge und Begriffe informiert sein:

2.1 Grundlagen

- Schwarzkörperstrahlung
- Näherung von Rayleigh-Jeans, Wien'sches Verschiebungsgesetz
- Absorption und Emission von Strahlung
- Grundlagen der Himmelsmechanik, Satellitenbahnen
- Optik: Beugung am Spalt

Es empfiehlt sich dabei zur Vorbereitung mit Literatur aus der Radioastronomie zu arbeiten[1, 2], da dort der unmittelbare Zusammenhang zwischen der grundlegenden Physik und der Anwendung in der Astronomie deutlicher wird.

2.2 Spezielle Begriffe und Techniken der Radioastronomie

Diese Begriffe sollten in der Vorbereitung behandelt werden. Dazu dienen auch die in der Literaturliste angegebenen Quellen.

- Reziprozitätstheorem
- Die Sonne als Radioquelle

- Einfluss der Atmosphäre auf elektromagnetische Strahlung (Radiofenster)
- Airmass (Weglänge durch die Atmosphäre)
- Richtdiagramm der Antenne
- Techniken zur Bestimmung des Richtdiagramms
- Korrekturfaktoren (efficiencies) im Richtdiagramm
- Antennentemperatur
- Zusammenhang zwischen dem Richtdiagramm und den Anteilen der Antennentemperatur
- Kalibration der Antennentemperatur
- Empfängerrauschen
- Y-Faktor Kalibration
- Heterodynprinzip.

Die Fragen aus Abschnitt 3 sollen für den Versuchstag vorbereitet und in der Ausarbeitung schriftlich beantwortet werden.

Falls die Ausarbeitung mit einem Textverarbeitungssystem erstellt wird, muss die endgültige Fassung (nach allen Korrekturen) auch elektronisch (\LaTeX , *OpenOffice* oder *Word*-Format – nicht PDF) eingereicht werden.

2.3 Kurze Zusammenfassung der Theorie

Eigenschaften der Strahlung In der Radioastronomie hat man es in der Regel mit inkohärenter Strahlung zu tun. Das heißt, die Strahlung besteht aus einem Gemisch statistisch voneinander unabhängigen Wellenzügen. Die Wellenzüge unterscheiden sich in Frequenz und Phasenlage.

Strahlungsintensität Die Intensität der Strahlung ist in diesem Versuch die entscheidende Messgröße, da sie direkt der Temperatur proportional ist. Das Spektrum eines Schwarzkörpers wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. Für nicht zu kleine Temperaturen und nicht zu große Frequenzen ($h\nu \ll kT$) kann man die Exponentialfunktion im Strahlungsgesetz in einer Taylorreihe entwickeln. Bricht man nach dem ersten Glied ab, so erhält man die Näherung von Rayleigh-Jeans. Abbildung 1 zeigt das Strahlungsspektrum eines Schwarzkörpers.

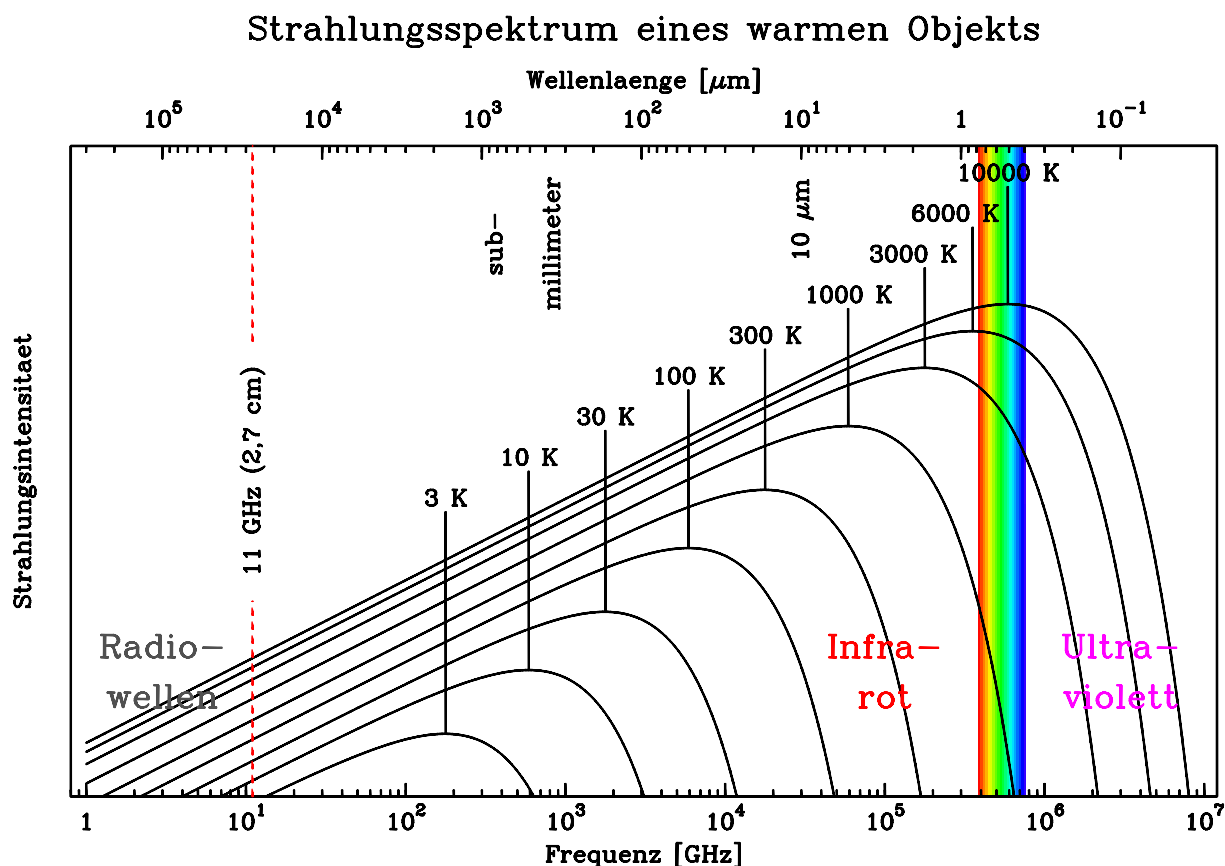


Abbildung 1: Das Strahlungsspektrum eines Schwarzkörpers.

Bei der untersuchten Frequenz von ca. 11 GHz und einer zunächst geschätzten Sonnentemperatur von etwa 6000 K gilt:

$$\frac{h\nu}{k} = 0,53 K$$

$$T = 6000 K$$

Offensichtlich ist

$$\frac{h\nu}{k} \ll T.$$

Die Rayleigh-Jeans-Näherung ist also genau genug. Da im Rahmen dieser Näherung die Intensität direkt proportional zur Temperatur ist, werden in der Radioastronomie die beiden Begriffe häufig synonym verwendet.

Absorption und Emission von Strahlung Obwohl die Intensität B unabhängig von der Entfernung zur Quelle ist, kann es zu einer Veränderung der Intensität entlang eines Weges x kommen. Dabei kann sowohl Absorption als auch Emission die Intensität beeinflussen. Die Abschwächung der Intensität durch Absorption in einem Medium (Wolke) ist gegeben durch:

$$B = B_0 e^{-\tau_c}. \quad (1)$$

B_0 ist die Intensität vor Eintritt in das Medium, τ_c die optische Tiefe. Bei konstanter Absorptionskonstante α des Mediums läßt sich τ_c als αx schreiben. Die Emission des Mediums ist gegeben durch:

$$B_c = B_i (1 - e^{-\tau_c}). \quad (2)$$

B_i ist dabei die Quellfunktion der Eigenemission der Wolke. Damit erhält man für den Fall einer Wolke, welche emittiert und absorbiert, die gesamte Intensität:

$$B = B_0 e^{-\tau_c} + B_i (1 - e^{-\tau_c}) \quad (3)$$

Dies läßt sich in Einheiten der Temperatur ausdrücken und man erhält:

$$T = T_0 e^{-\tau_c} + T_c (1 - e^{-\tau_c}), \quad (4)$$

wobei T_c die Temperatur der Wolke ist. Im realen Fall liefert diese Gleichung zum Beispiel die beobachtete Temperatur einer Quelle nach dem Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre.

Das Reziprozitätstheorem Das Reziprozitätstheorem besagt, dass die Strahlungscharakteristik einer Antenne immer gleich ist, unabhängig davon ob sie als Sende- oder Empfangsantenne benutzt wird. Dies ist analog zur Umkehrbarkeit des Strahlengangs in der Optik.

Antennenkalibration Die in der ADC-Karte im Messcomputer gemessene Spannung ist direkt proportional zu der vom Teleskop empfangenen Leistung.

$$V_{ADC} = c T_{sys} \quad (5)$$

$$T_{sys} = T_A + T_{rec} \quad (6)$$

T_{sys} ist die Systemtemperatur, wie sie nach dem Empfänger gemessen wird. Sie setzt sich aus dem Eigenrauschen des Empfängers (T_{rec}) und der empfangenen Signalstärke T_A zusammen. c ist eine durch die Kalibration zu bestimmende Proportionalitätskonstante. T_{rec} kann mit einer Y-Faktor Kalibration bestimmt werden.

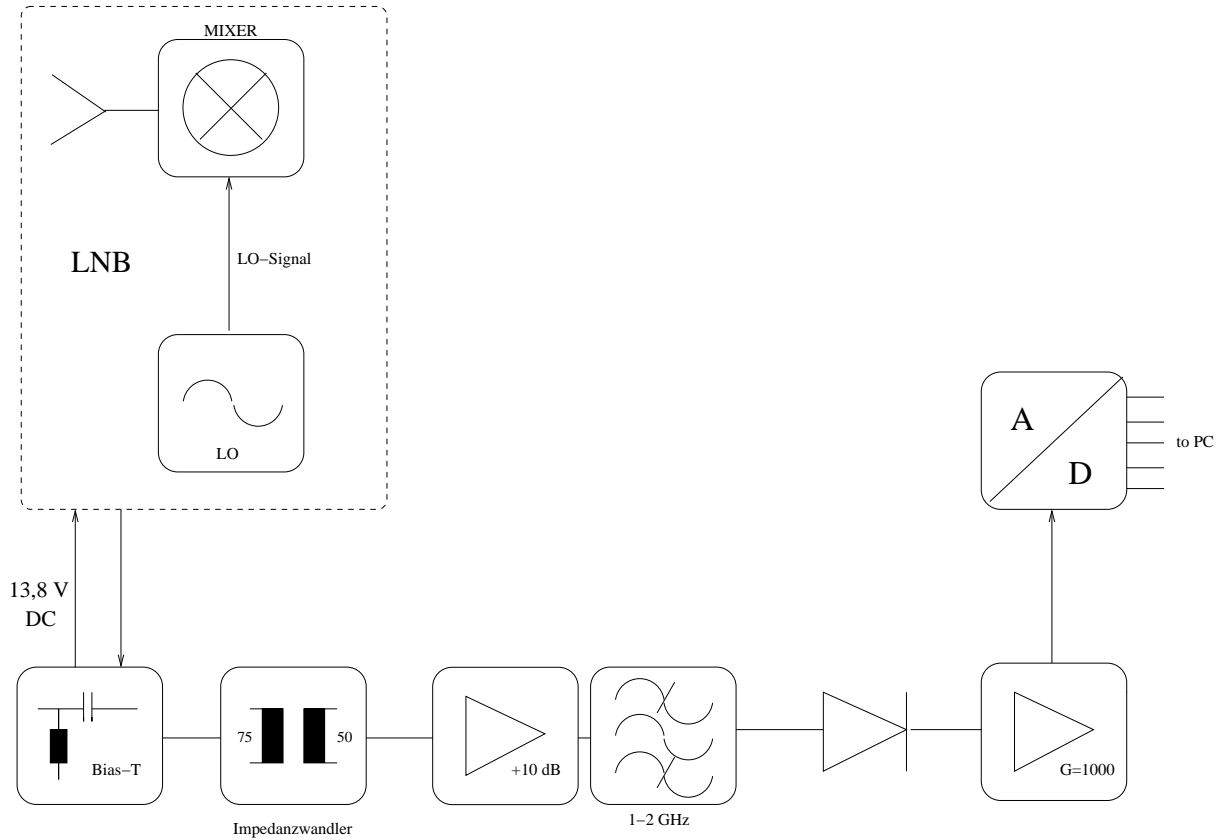


Abbildung 2: Das Blockschaltbild des Empfängers

Die Antennentemperatur T_A bezeichnet die sog. Antennentemperatur. Will man von dieser Temperatur auf die Eigenschaften der beobachteten Quellen rückschließen, muss man die Anteile aus denen sich T_A zusammensetzt, genau kennen (Abb. 5).

$$T_A = T_S^* + T_{Cosm}^* + T_{amb}^* + T_{atm}^* \quad (7)$$

Im ersten Term T_S^* ist die Strahlung berücksichtigt, die von der Quelle (Source) kommt. T_{Cosm}^* berücksichtigt denjenigen Beitrag, den die Antenne von der kosmischen Hintergrundstrahlung (2.7K) sieht. T_{amb}^* berücksichtigt den Anteil der Strahlung, die aus dem warmen Boden bzw. der Umgebung (ambient) der Antenne in den LNB fällt. In T_{atm}^* geht die Temperatur der Atmosphäre ein, wie sie von dem Teleskop empfangen wird. Die *-Markierung bedeutet, dass die jeweiligen Temperaturen korrigiert wurden, für den Anteil, mit dem sie zur Antennentemperatur beitragen (s.u.).

Das Richtdiagramm der Antenne Das Richtdiagramm $P_n(\Omega)$ beschreibt die relative, richtungsabhängige Empfindlichkeit des Teleskops. $P_n(\Omega)$ ist normiert, d.h. $P_n(0) = 1$. Um das Teleskop genau kalibrieren zu können, muss das Richtdiagramm auf der gesamten, das Teleskop umgebenden Kugeloberfläche bestimmt werden. Man teilt das Richtdiagramm in zwei Bereiche auf: die sog. Hauptkeule (main lobe) der Antenne und den Nebenkeulen- (minor lobes) und Streubereich. Die Restempfindlichkeit jenseits der Hauptkeule entsteht durch Beugung am Schüsselrand, Streuung und durch spill-over. Spill-over bedeutet, dass der LNB eine Restempfindlichkeit jenseits des Schüsselrandes besitzt. Der LNB nimmt al-

so Strahlung auf, die direkt vom warmen Boden kommt (dies ist z.B. der Beitrag T_{amb} zu T_A).

Bei der Bestimmung des Richtdiagramms kann auf verschiedene Weise vorgegangen werden. Es kann berechnet oder vermessen werden.

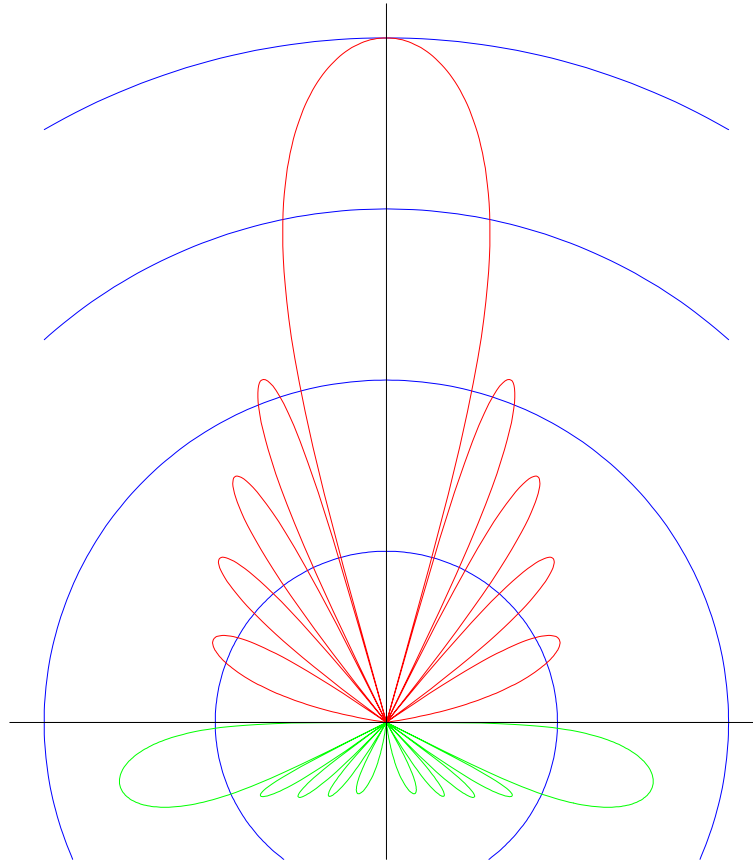


Abbildung 3: Schematisches Antennenrichtdiagramm in polarer (logarithmischer) Darstellung. Der rote Bereich stellt die Empfindlichkeit im vorderen Halbraum dar, bestehend aus Hauptkeule und Nebenkeulen. Der grüne Bereich beschreibt die Empfindlichkeit im hinteren Halbraum, die durch Spill-Over Effekte zustande kommt.

Korrekturfaktoren (*efficiencies*) Quantitativ werden die Bereiche des Antennendiagramms durch 2 Effizienzterme η_{fss} (*forward spillover and scattering*) und η_{rss} (*rearward spillover and scattering*) beschrieben:

$$\eta_{fss} = \frac{\iint_{\Omega_D} P_n(\Omega) d\Omega}{\iint_{2\pi} P_n(\Omega) d\Omega} = 66\% \quad (8)$$

$$\eta_{rss} = \frac{\iint_{2\pi} P_n(\Omega) d\Omega}{\iint_{4\pi} P_n(\Omega) d\Omega} = 87\% \quad (9)$$

Mit Ω_D ist hierbei der Raumwinkel bezeichnet, der von der Hauptkeule eingenommen wird. Mit den Integralen über 2π ist jeweils der vordere Halbraum gemeint. η_{fss} ist damit

also der Bruchteil der aus dem vorderen Halbraum empfangenen Leistung, der aus dem Bereich der Hauptkeule empfangen wird, und η_{rss} ist der Anteil des gesamten Antennen-diagramms, der aus dem vorderen Halbraum empfangen wird.

Der Einfachheit halber wird häufig die Hauptkeule als zweidimensionale Gausskurve approximiert.

Kopplungseffizienz Falls die beobachtete Quelle kleiner ist als die Hauptkeule, muss berücksichtigt werden, dass nur ein Teil der von der Antenne empfangenen Strahlung von der Quelle kommt. Man muss also abschätzen, welcher Bruchteil η_c der Hauptkeule von der Quelle ausgefüllt wird (Abb. 4):

$$\eta_c = \frac{\iint_{\Omega_D} T_{n,Source}(\Omega) P_n(\Omega) d\Omega}{\iint_{\Omega_D} P_n(\Omega) d\Omega}. \quad (10)$$

$T_{n,Source}$ ist die normierte Temperaturverteilung der Quelle. In unserem Fall nehmen wir eine konstante, kreisförmige Temperaturverteilung an, d.h. $T_{n,Source}$ ist konstant 1 im Bereich der Sonnenscheibe und konstant 0 außerhalb der Sonnenscheibe.

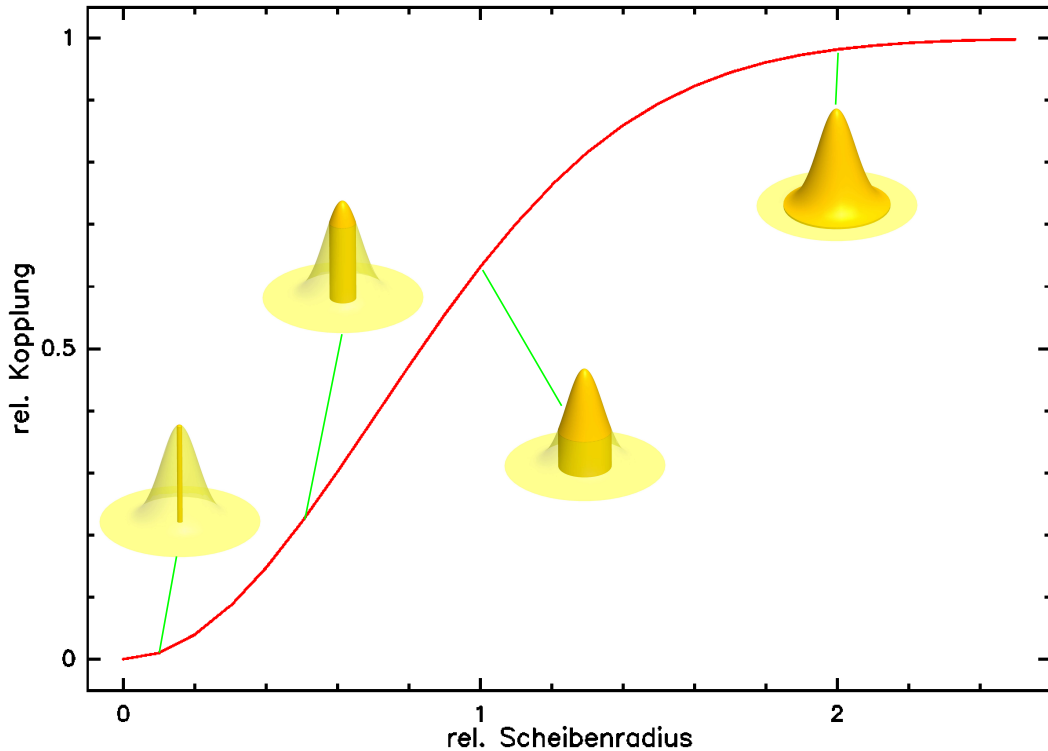


Abbildung 4: Kopplungseffizienz η_c in Abhängigkeit der Quellengröße relativ zur Breite der Antennenkeule. Nur der dunkel eingefärbte Anteil der Antennenkeule empfängt Strahlung von der Quelle.

Mit der Annahme einer Gauss-förmigen Hauptkeule und einer scheibenförmigen Quelle konstanter Temperatur läßt sich η_c analytisch berechnen.

Der Einfluss der Atmosphäre Bei Messungen mit einem erdgebundenen Teleskop ist die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die Strahlung ein entscheidender Faktor. Der Einfluss der Atmosphäre ist stark wellenlängenabhängig. So gibt es vor allem zwei Frequenzfenster, in denen vom Erdboden aus Astronomie betrieben werden kann. Zum einen der optische Bereich, zum anderen das sog. Radiofenster. Das Radiofenster ist auf den Bereich von 20 MHz bis etwa 300 GHz beschränkt. An der unteren Grenze ist die Elektronendichte der Ionosphäre für den Grad der Durchlässigkeit ausschlaggebend. Durch die Ultraviolettstrahlung der Sonne wird die Atmosphäre zunehmend ionisiert. Die dabei entstehenden freien Elektronen verhindern die Ausbreitung von elektromagnetische Wellen unterhalb einer gewissen Frequenz. Für radioastronomische Untersuchungen ist diese Grenze allerdings nur von geringer Bedeutung. Die obere Grenze des Radiofensters bei 300 GHz ist vor allem durch die Absorption von Strahlung durch Luftmoleküle (O_2 und Wasser) bedingt. Aus diesem Grund stehen die Observatorien, mit denen im mm-Wellenbereich beobachtet werden soll, vorwiegend auf hohen Bergen mit dünner, trockener Luft.

Auch innerhalb des Radiofensters wird die zu messende Strahlung auf verschiedene Arten beeinflusst. Absorption, Brechung und Szintillation sind die zu berücksichtigenden Effekte. Für die Messungen mit der Satellitenschüssel werden vor allem Absorption und Brechung in der Troposphäre eine Rolle spielen.

Zur Bestimmung der atmosphärischen Transmission macht man sich den Zusammenhang aus Gleichung 4 zunutze: eine Atmosphäre mit Transmission $t = \exp(-\tau_{Atm}) < 1$ macht sich durch eine Emission von $T_{Atm} \cdot (1 - t)$ bemerkbar. Variiert man nun in kontrollierter Weise die Weglänge, die die Strahlung durch die Atmosphäre nimmt, so kann aus der charakteristischen Variation des empfangenen Signals auf die optische Tiefe der Atmosphäre zurückgerechnet werden.

Dazu schwenkt man die Antenne in der Elevationskoordinate vom Zenith zum Horizont (Skydip) und misst die empfangene Leistung in Abhängigkeit der Airmass (d.h. der Weglänge durch die Atmosphäre relativ zur Zenithweglänge). Zur Vereinfachung nehmen wir die Atmosphäre als planparallele Schicht an.

Diese Messung wird dadurch verfälscht, dass bei der Skydip-Messung der nach hinten gerichtete Anteil der Antennenkeule ein variables Signal sieht (warum?). Das wird durch eine zusätzliche Skydip-Messung mit verdeckter Antennenoberfläche korrigiert.

Die Antennentemperatur T_A Nun sind nochmals alle Rauschanteile zu T_A zusammengefasst (Abb. 5):

$$T_A = T_S^* + T_{Cosm}^* + T_{amb}^* + T_{atm}^* \quad (11)$$

Erarbeiten Sie in Vorbereitung auf die Auswertung die Ausdrücke für die mit * gekennzeichneten korrigierten Strahlungstemperaturen T_i^* . Beispiel:

$$T_{Cosm}^* = T_{Cosm} \cdot \eta_{rss} \cdot (1 - \eta_{fss} \eta_c) \cdot \exp(-A \cdot \tau_Z) \quad (12)$$

Dies bedeutet, dass die physikalische Temperatur T_{Cosm} für die Vorwärtsrichtung mit η_{rss} , also 87% und für Dämpfung und Airmass mit $\exp(-A \cdot \tau_Z)$ korrigiert werden muss. Abgezogen wird der Anteil der Emission, die von der Sonne kommt.

Stellen Sie die entsprechenden Korrekturen für die anderen Terme in T_A auf.

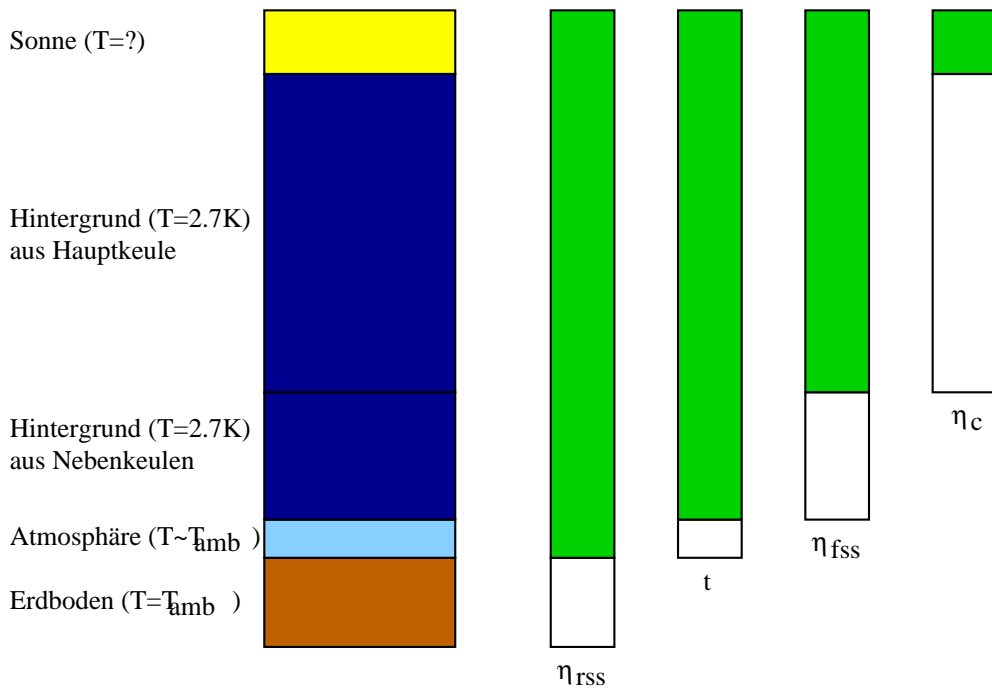


Abbildung 5: Die Abbildung verdeutlicht die unterschiedlichen Beiträge zum Gesamtsignal, das von der Antenne empfangen wird.

3 Fragen

Beantworten Sie folgende Fragen. Wo nötig, machen Sie sinnvolle Annahmen.

1. Geben Sie die Bahnperioden einiger terrestrischer Satelliten an: ISS, ASTRA, Mond. Berechnen Sie die zugehörigen Bahnradien
2. Schätzen Sie die Breite der Antennenhauptkeule ab (Stichworte: Reziprozitätstheorem, Beugung am Spalt). Der Durchmesser des Teleskopes beträgt 1 m.
3. Schätzen Sie die Breite der Antennenhauptkeule Ihres Auges (ja!) ab. Was bedeutet das?
4. Leiten Sie die Formel für den Kopplungskoeffizienten η_c her unter der Annahme einer Gauss-förmigen Antennenhauptkeule und einer konzentrischen, kreisrunden, scheibenförmigen Quelle konstanter Temperatur.
5. Schätzen Sie den Kopplungskoeffizienten $\eta_{c,\text{Sonne}}$ zwischen der Antennenhauptkeule und der Sonnenscheibe ab.
6. Schätzen Sie den Kopplungskoeffizienten $\eta_{c,\text{ASTRA}}$ zwischen der Antennenhauptkeule und der Sendeantenne von ASTRA ab.
7. Wie ist der formale Zusammenhang zwischen atmosphärischer Transmission und Elevation der Antenne (Fitfunktion für die Skydip-Messung)?

4 Messaufgaben

Folgende Messungen sind durchzuführen:

1. Kartieren sie einen Satelliten. Befehle dazu:
`pos astra.in`: Auswählen eines Satelliten als Quelle.
`measure map 9 0.6`: Kartiere den Satelliten (genauer: die Antennenkeule) mit einer 9×9 -Karte, mit 0.6 Grad Pixelabstand.
2. Kalibration der Antennentemperatur mit Stickstoff und Umgebungstemperatur. Dazu wird der Empfänger im Brennpunkt der Schüssel nacheinander von einem Dewargefäß mit Stickstoff und einem Absorber auf Umgebungstemperatur verdeckt. Der LNB muss dazu möglichst steil nach unten gerichtet sein, was mit `pos cal.in` erreicht werden kann: Das Teleskop schwenkt dann in Richtung Zenith. Die Datenaufnahme geschieht dann mit dem Befehl `measure stare 500` (“Starre 500 Sekunden lang in den Zenith”). Der Umgebungstemperatur-Absorber sollte einige Zeit an der Außenluft liegen, um sich auf eine definierte Temperatur einzustellen.
3. Skydip mit offener Parabolantenne.
4. Skydip mit verdeckter Parabolantenne. Bedecken sie die Schüssel mit dem großen Absorber.
5. Kartieren der Sonne.
6. Bestimmung der Außentemperatur. Ein Thermometer ist vorhanden.

Die Sonnenkarte wird mehrfach aufgenommen. Im Anschluß daran werden die Kalibrationsmessungen wiederholt. Führen sie alle Messungen so zeitnah wie möglich durch. Eine Veränderung der Bedingungen während der Messung hat eine Verfälschung der Ergebnisse zur Folge.

5 Auswertung

Zunächst müssen sie die Kopplung der Sonne mit der Hauptkeule des Antennendiagramms bestimmen. Dazu wird vom Praktikumsbetreuer am Praktikumstag ein 2-dimensionaler Gaussfit an die Karte des Satelliten angelegt. Aus den Parametern des Gaussfits bestimmen Sie analytisch das Kopplungsintegral. Die anderen Korrekturfaktoren müssen sie nicht selber bestimmen, sondern beim Betreuer erfragen.

Aus den Skydips kann die atmosphärische Dämpfung der Atmosphäre bestimmt werden. Dazu muss zunächst der *rearward spillover* vom eigentlichen Skydip abgezogen werden. An das resultierende Diagramm kann dann eine Funktion angelegt werden, die dem Dämpfungsgesetz entspricht.

Zu Bestimmung der Sonnentemperatur müssen die gemessenen Karten gemittelt werden. Aus dem Maximum der gemittelten Karten kann die Antennentemperatur berechnet werden.

6 Benutzeranleitung und Kommandos

Der Versuch “Radioastronomie” im Fortgeschrittenenpraktikum wird über einen Linux-PC gesteuert, auf dem verschiedene Prozesse (laufende Programme) miteinander kommunizieren. Das Kommunikationsmedium ist dabei `KOSMA_file_io`, das im 1. Physikalischen Institut entwickelt wurde und auch beim KOSMA-Radioteleskop[3] auf dem Gornergrat, Schweiz, sowie auch bei NANTEN2[4] und SOFIA[5] eingesetzt wird.

6.1 Benutzen des Systems

1. Die Benutzeroberfläche enthält sechs virtuelle Bildschirme, zu denen oben links im Dock navigiert werden kann. Der erste davon enthält vier Befehlsfenster, in denen verschiedene Server wie folgt laufen (oder gestartet werden) müssen:
 - Im Befehlsfenster oben rechts `astra_server` eingeben. Das startet den Ephemeridenrechner, der die augenblickliche Position der Sonne, des Mondes etc. berechnet. **Wichtig: Uhrzeit des Rechners kontrollieren!** Diese geht in die Positionsberechnung ein (Die augenblicklichen Koordinaten werden in eine Datei an definiertem Ort geschrieben.).
 - Im Befehlsfenster oben links `tracker_server` eingeben. Der Tracker liest die Koordinaten aus der vom `astra_server` geschriebenen Datei und fährt die Satellitenschüssel auf Position, sofern die Soll-Position um mehr als 0.2° von der Ist-Position abweicht.
 - Im Befehlsfenster unten links ins Verzeichnis `~/gruppen/<nummer>` wechseln.

6.2 Kommandos

- `pos`: Wählt das zu verfolgende Objekt. Syntax: `pos XYZ.in`. XYZ darf dabei sein `SUN` `MOON` `astra` `hotbird` `eutelsat` `cal`. `SUN` und `MOON` verfolgen die beiden Himmelskörper, bei `astra`, `hotbird` und `eutelsat` wird der entsprechende Satellit angefahren, bei `cal` die Position, bei der die Kalibration am einfachsten durchgeführt werden kann (Dewar-Gefäß).
- `measure`: Startet eine Messung. Syntax: `measure <command> X [Y]`, wobei `<command>` eines von folgenden ist:
 - `h, help`: Display this message
 - `c, cross`: Take a cross scan with X by X points spaced by Y
 - `l, line`: Take a line scan with X points spaced by Y
 - `m, map`: Take a map with X by X points spaced by Y
 - `n, nod`: Take beam switch scans with X points, AZ-offset Y [deg]
 - `s, stare`: Take X scans at current position, with a frequency of 1 Hz
 - `t, table`: Take one scan at each offset in file X (or stdin)

Die Daten werden in das Verzeichnis `daten` unterhalb des Verzeichnisses geschrieben, in dem `measure` gestartet wurde.

- **gaussfit**: Berechnet die Gaußverteilung aus einer mit **measure** $m \times N$ **deg** gemessenen Karte. Syntax: `cat datafile | gaussfit`. Die Bildschirmausgabe enthält die Start- und Fitwerte für die Gaußverteilung. Sie kann auch durch Weiterleitung in eine Datei gespeichert werden: `cat datafile | gaussfit > fitfile`.

6.3 Auswertung

Auf dem Messrechner gibt es das Programm **gaussfit**. Es erlaubt, eine 2D-Gaußglocke an ein Karte bzw. ein Antennenpattern zu fitten und gibt die Fitresultate aus. Dies kann unmittelbar nach der Aufnahme der Karte geschehen: `cat <mapnumber>.msr | gaussfit`. Zum späteren Gebrauch kann diese Fitwertausgabe auch in eine Datei gespeichert werden: `cat <mapnumber>.msr | gaussfit > <mapnumber>.fit`. Dabei ist aber zu beachten, dass die Zielfile mit der Endung **.fit** (oder irgend einer anderen von **.msr** verschiedenen)

7 Literatur

Literatur

- [1] J. D. Kraus, *Radio Astronomy*, Cygnus-Quasar Books, 1986.
- [2] O. Hachenberg and B. Vowinkel, *Technische Grundlagen der Radioastronomie*, Mannheim; Wien; Zürich: Bibliographisches Institut, 1982., Wien, 1982.
- [3] “KOSMA: Kölner Observatorium für SubMillimeter Astronomie”, (<http://www.ph1.uni-koeln.de/gg/>).
- [4] “NANTEN2 (Chile)”, (http://www.ph1.uni-koeln.de/workgroups/astro_instrumentation/nanten2/)
- [5] “SOFIA: Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy”, (<http://www.sofia.usra.edu>).