

Mikrowellen-Radiometer

Betreuer: Bernd Vowinkel

tel. (470-)3550

Raum 307

vowinkel@ph1.uni-koeln.de

Vorbemerkung

Die Vorbereitung und Durchführung dieses Versuchs soll dem Studenten ein grundlegendes Verständnis für die wichtigsten Begriffe und Messgrößen eines Heterodyn-Radiometers vermitteln. Der Versuchsaufbau enthält im Prinzip alle wesentlichen Komponenten eines Heterodyn-Empfangssystems, wie es in der Erderkundung, der Atmosphärenerkundung, der Plasma-diagnostik (Fusionsforschung) und der Radioastronomie zum Einsatz kommt. Dieser Versuch ist somit thematisch eng mit Projekten unseres Instituts verbunden (!) und soll das Interesse für eine Diplomarbeit in einer unserer Arbeitsgruppen wecken.

Hinweise zur Versuchsvorbereitung

Fettgedruckte Begriffe, sowie alle Formeln sollten in der schriftlichen Vorbereitung behandelt, d. h. erläutert bzw. hergeleitet werden. Ebenso sind die im Abschnitt „Hinweise zur schriftlichen Auswertung“ aufgeführten Punkte zu beherzigen. Rechtzeitig vor dem Versuchstag sollten vom Betreuer begleitende Unterlagen ausgeliehen werden.

1. Einleitung

Die moderne Astrophysik widmet sich insbesondere dem Verständnis der Stern- und Planetenentstehung. Wichtig hierfür sind spektral und räumlich hoch aufgelöste Beobachtungen der Sternentstehungsregionen mit ihren assoziierten Molekülwolken. Insbesondere die elektromagnetische Strahlung der dort vorhandenen Moleküle im Frequenzbereich von 100 GHz bis zu einigen 1000 GHz ist hier von Interesse. Aus der beobachteten räumlichen Verteilung des Gases, dessen Anregungszustände und der Form der Linienprofile verschiedener Molekülspezies und Molekülübergänge lässt sich der physikalische und dynamische Zustand der Materie bestimmen und mit Modellvorhersagen vergleichen.

Für die dafür notwendige höchstauflösende Spektroskopie verwendet man Teleskope mit **Heterodyn-Radiometer** als Empfänger (je nach betrachteter Wellenlänge spricht man von Millimeter- bzw. Submillimeterwellenempfängern), welchen das **Heterodynprinzip** zu Grunde liegt. Hier wird das empfangene Signal durch Mischung mit einer festen Oszillatorfrequenz des **Lokaloszillators** (LO) auf eine signifikant tieferliegende **Zwischenfrequenz** (ZF) umgesetzt. Notwendig wird dieses Verfahren aufgrund folgender Tatsachen:

- Oberhalb von 100 GHz gibt es zur Zeit keine genügend rauscharmen Verstärker mit denen die extrem schwachen extraterrestrischen Signale verstärkt werden könnten. Das durch den Mischer ohne Informationsverlust auf die wesentlich niedrigere ZF (typischerweise im Bereich von 1 – 10 GHz) umgesetzte Signal kann dafür verstärkt und dann zur spektralen Analyse den Spektrometern zugeführt werden.
- Die sehr hohe spektrale Auflösung (Größenordnung 10^{-7}), die für die Spektroskopie notwendig ist, kann nicht über Bandpassfilter am Radiometereingang erreicht werden.

Als Frequenzmischer werden heutzutage in der Radioastronomie **SIS-Mischer** (SIS = Supraleiter-Isolator-Supraleiter Tunnelbarrieren) mit großem Erfolg eingesetzt, und sie haben die vorher weit verbreiteten **Schottky-Dioden** weitestgehend ersetzt. Aufgrund der supraleitenden Materialeigenschaften zeigen sie eine geradezu ideale **nichtlineare Strom-Spannungs-Kennlinie**, und bieten als sogen. **Quantenmischer** daher eine größtmögliche **Mischeffizienz**.

Aufgrund des Mischprozesses gelangen Signale aus beiden **Seitenbändern** in die ZF-Verstärkungskette. Um eine eindeutige Identifikation der Spektren zu erzielen, muss meist ein Seitenband herausgefiltert werden (Einseitenbandbetrieb **SSB** bzw. Zweiseitenbandbetrieb **DSB**).

1. Passive Mikrowellenradiometrie

Ein Radiometer für die **passive Mikrowellenradiometrie** muss, insbesondere beim astronomischen Einsatz, in der Lage sein, extrem kleine Signalleistungen nachweisen zu können. Nach dem **Nyquist-Theorem** ist die elektromagnetische thermische Rauschleistung P proportional der physikalischen Temperatur T eines äquivalenten **schwarzen Strahlers** und der Empfangsbandbreite $\Delta\nu$:

$$P = k_B T \Delta\nu \quad (1)$$

Die Antenne ist das erste Bauteil eines Radiometers. Sie erzeugt zwar selbst praktisch keine Rauschleistung, an ihrem Ausgang steht aber eine Rauschleistung zur Verfügung, die auf die empfangene elektromagnetische Strahlung zurückzuführen ist. Nach Gleichung (1) kann man diese Leistung einer **Strahlungstemperatur** zuordnen. Man nennt diese Temperatur dann **Antennentemperatur** T_A . Bei einer technisch festgelegten Empfangsbandbreite kann man damit aufgrund von Gleichung (1) auch sagen, dass der Empfänger möglichst kleine Änderungen der Antennentemperatur nachweisen können sollte.

Nun bestehen Empfänger aus Bauteilen, die zum Teil selbst eine Rauschleistung erzeugen (**thermisches Rauschen, Schrotrauschen**, usw.). Diese ist prinzipiell nicht von der über die Antenne empfangenen Signalleistung zu unterscheiden. Die gesamte, vom Empfangssystem gemessene, Rauschleistung P_{sys} setzt sich also aus der Eigenrauschleistung des Empfängers P_R und der Rauschleistung der Antenne P_A zusammen:

$$P_{\text{sys}} = P_R + P_A \quad (2)$$

bzw. mit (1)

$$T_{\text{sys}} = T_R + T_A \quad (3)$$

Hierbei nennt man T_{sys} die Systemrauschtemperatur, T_R die **Empfängerrauschtemperatur** und T_A die Antennentemperatur.

Es ist klar, dass sich die Nachweisgrenze mit steigender Empfängerrauschtemperatur verschlechtert. Genauer wird dieser Zusammenhang durch die so genannte **Radiometerformel** beschrieben:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\tau \cdot \Delta\nu}} \quad (4)$$

mit der Integrationszeit τ und der Nachweisgrenze ΔT .

2. Rauschbeiträge der Einzelkomponenten eines Radiometers

Eine wichtige Frage für den optimalen Aufbau eines Empfängers ist, welche Komponenten den wesentlichen Beitrag zur Empfängerrauschtemperatur liefern. Denkt man sich den Empfänger als eine Kettenschaltung von einzelnen Stufen (z. B. Verstärkerstufen), wobei jede Stufe durch ihren Leistungsverstärkungsfaktor G_x und ihre Eigenrauschtemperatur T_x charakterisiert ist (Abb. 1), so gilt für die äquivalente, auf den Eingang bezogene, **Gesamtrauschtemperatur** der Kette:

$$T = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_N}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}} \quad (5)$$

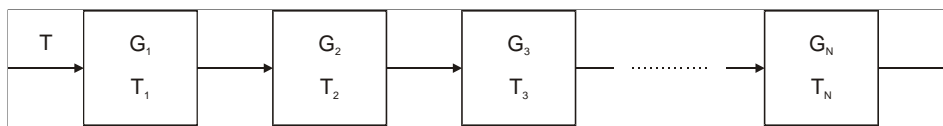


Abb. 1: Kettenschaltung einzelner Radiometerkomponenten

Der wesentliche Beitrag zur Gesamtrauschtemperatur kommt also i. Allg. von den ersten Verstärkerstufen und den verlustbehafteten Komponenten davor. Bei diesen Stufen muss daher besonderer Wert auf geringes Eigenrauschen gelegt werden.

Bei einem Heterodyn-Radiometer ist i. Allg. der Mischer das erste Glied in der Kette. Fasst man die ZF-Verstärkerkette zu einem Glied zusammen, das die Rauschtemperatur T_{ZF} besitzt, so ergibt sich aus Gleichung (5):

$$T_R = T_M + L \cdot T_{ZF} \quad (6)$$

Hierbei ist T_M die **Eigenrauschtemperatur** des Mixers und L der sogenannte **Mischverlust** (Kehrwert der Verstärkung).

Es stellt sich nun die Frage, wie die Grenzempfindlichkeit für ein spezielles Radiometer messtechnisch bestimmt werden kann. Die Bandbreite $\Delta\nu$ ist durch ein Bandpassfilter oder dem Frequenzgang der Verstärker festgelegt und damit bekannt. Das gleiche gilt für die Integrationszeit τ , die durch die Schaltelemente des Integrators bestimmt ist. Es bleibt also die Ermittlung der Systemrauschtemperatur T_{sys} , bzw. der Empfängerrauschtemperatur T_R . Hierzu misst man die Gesamtrauschleistung für verschiedene, genau bekannte Antennentemperaturen T_A (**Hot-Cold-Verfahren**). Nach (2) und (3) ist

$$T_{sys} = T_R + T_A = c \cdot P_{HF} \quad (7)$$

mit einer Konstante c .

Erzeugt man einmal eine hohe Antennentemperatur T_H und dann eine niedrige T_C , so ist die jeweils entsprechende Rauschleistung:

$$P_H = (T_H + T_R) \cdot c \quad (8)$$

$$P_C = (T_C + T_R) \cdot c \quad (9)$$

Aus dem gemessenen Leistungsverhältnis $P_H/P_C = Y$ kann man dann die Empfängerrauschtemperatur bestimmen:

$$T_R = \frac{T_H - Y \cdot T_C}{Y - 1} \quad (10)$$

Zur Erzeugung einer hohen Antennentemperatur verwendet man meistens Absorbermaterial auf Raumtemperatur, das vor die Antenne gehalten wird (AUFGABENTEIL 5A). Für die niedrige Antennentemperatur kühlt man das Absorbermaterial mit flüssigem Stickstoff (77 K). Mit dieser Methode kann man natürlich auch die äquivalente Rauschtemperatur einzelner Komponenten (z. B. Verstärker) bestimmen (AUFGABEN 3 und 4). Anstelle einer Antenne kann hierbei z. B. ein angepasster Abschlusswiderstand (50Ω) verwendet werden, an dem die Hot-Cold-Messung durchgeführt wird (AUFGABENTEIL 5B).

3. Versuchsaufbau

Das für den Versuch verwendete Radiometer besteht aus einem Mischer, einem Transistor-Oszillator und zwei Zwischenfrequenzverstärkern. Zur Einstellung der Oszillatorleistung werden Dämpfungsglieder benutzt. Weiterhin kann noch ein zusätzliches Bandpassfilter in den ZF-Teil eingefügt werden.

Für die Messung der Oszillatorleistung bzw. der Ausgangsleistung der ZF-Verstärker wird das Leistungsmessgerät HP 436A benutzt. Im Aufgabenteil 2, 3 und 4 findet als Rauschquelle eine Rauschdiode HP 346B Verwendung. Die für die Analyse notwendige Diodenrauschtemperatur kann aus dem angegebenen ENR (excess noise ratio = Verhältnis der Diodenrauschtemperatur zur Raumtemperatur in dB, siehe Anhang) berechnet werden.

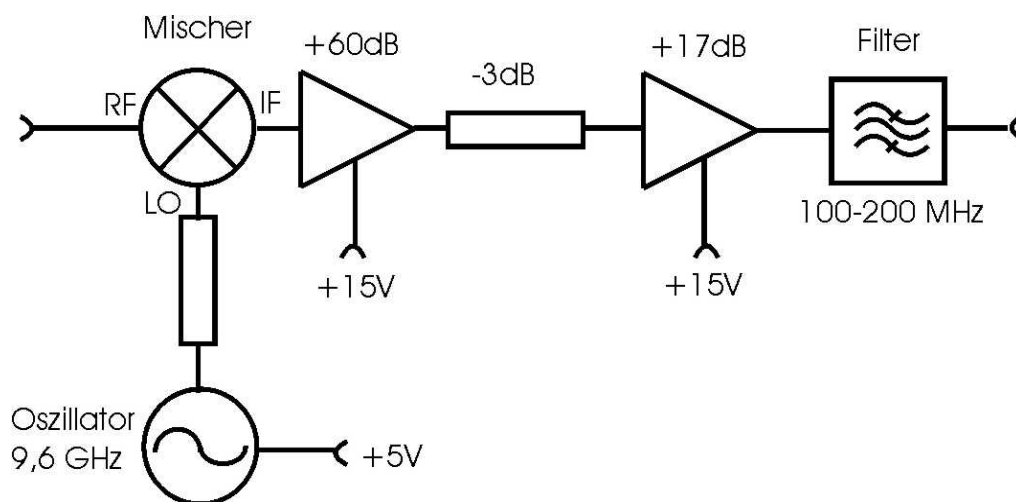


Abb.2: Schematischer Versuchsaufbau

4. Wichtige Hinweise zur Versuchsdurchführung

Die Bauteile des Heterodyn-Radiometers und das HF-Leistungsmessgerät (Powermeter HP 436A mit Messkopf HP 8481A) mögen optisch nicht besonders viel hermachen, sie sind aber voll funktionsfähig und teuer in der Anschaffung (das Powermeter ist als Gebrauchtgerät für DM 3000,- im SS2001 neu angeschafft worden) bzw. im Institut hergestellte Einzelanfertigungen (Oszillator und Verstärkerkette) und daher keine „Spielzeuge“.

- Aus Gründen der Praktikabilität sind die Bauteile in einem „losen“ Zustand und nicht fest verbunden, was zum (vorsichtigen) Experimentieren animieren soll.
- Da die Bauteile Oszillator, Mischer und Verstärkerkette elektrostatisch empfindlich sind, müssen sie mit Vorsicht gehandhabt werden. Dazu befinden sich auf der Tischoberfläche eine leitende Matte: Beim Zusammenschrauben der SMA-Steckverbindungen jeweils den Innenleiter des Steckers außen an der Masse seines Gegenstücks erden (wird vom Betreuer vorgemacht) und dabei die zu verbindenden Bauteile auf der Erdungsmatte ablegen.
- Die SMA-Überwurfmutter mit dem Maulschlüssel „nicht anknallen“! Handfest reicht für eine HF-dichte Verbindung.
- Auf die korrekte Polung der Spannungsversorgungen von Oszillator (+5 V) und Verstärkerkette achten (+12 V). Siehe Farbkennung!
- Geräte warmlaufen lassen (Leistungsanzeige vom Powermeter beobachten, das G der Verstärker verringert sich unmittelbar nach dem Einschalten und nimmt nach einer Weile einen konstanten Wert an).
- Nicht zuerst alle Hot- und dann alle Cold-Werte messen, sondern immer ein Hot-Cold-Wertepaar! Aufgrund einer möglichen Temperaturdrift des Powermeters, sollte dessen Nullpunkt häufiger kontrolliert und ggf. nachjustiert werden. Aus selbigem Grund sollte man jeweils ein Hot-Cold-Wertepaar in einer möglichst kurzen Zeit aufnehmen.
- grobe Skizze des Aufbaus zu den einzelnen Versuchsteilen ins **Messprotokoll**
- Ablesefehler für die Fehlerrechnung notieren

5. Aufgabenstellungen

Aufgabe 1: Kalibration der Dämpfungsglieder

Mit Hilfe des Oszillators und des Leistungsmessgeräts kalibriert man zunächst die koaxialen Festdämpfungsglieder. Zu beachten ist hierbei, dass insbesondere bei kleinen Leistungen der Nullpunkt des Leistungsmessgeräts kontrolliert und gegebenenfalls nachgestellt werden muss (der Betreuer zeigt wie).

Aufgabe 2: Bestimmung der Empfängerrauschtemperatur $T_R(P_{LO})$

Man bestimme die Rauschtemperatur des Empfängers (Mischer + ZF-Kette) in Abhängigkeit der Oszillatorleistung (1dB-Schritte bis max. 10dB mit der Kombination von Festdämpfungsgliedern) mit Hilfe der Rauschdiode (Ein-Aus entspricht Hot-Cold). Im ausgeschalteten Zustand kann für die Rauschdiode Raumtemperatur, d.h. 293 K angenommen werden. Winkelstecker und andere überflüssige Steckverbindungen zwischen Mischer und Rauschdiode sind zu vermeiden. Für alle folgenden Messungen wird die Dämpfung der Oszillatorleistung auf den optimalen Wert (d.h. für die beste Rauschtemperatur) fest eingestellt (mit dem entsprechenden Dämpfungsglied).

Aufgabe 3: Bestimmung der ZF-Rauschtemperatur

Man bestimme die Rauschtemperatur der ZF-Verstärkerkette mittels Rauschdiode. Dann wiederhole man diese Messung mit eingebautem Bandpassfilter einmal vor der ZF-Verstärkerkette und einmal hinter der ZF-Verstärkerkette. Welche Position des Bandpassfilters ist für das Radiometer am günstigsten? Wie lautet die Erklärung dafür? Mit der optimalen Position des Bandpassfilters wiederhole man die Bestimmung der Rauschtemperatur mit Hilfe des Abschlusswiderstands auf Raumtemperatur (Hot) und in flüssigem Stickstoff (Cold).

Aufgabe 4: Bestimmung des Mischverlusts L

Man bestimme den Mischverlust, indem man die ZF-Rauschtemperatur durch Einbau von Dämpfungsgliedern zwischen Mischer und ZF-Verstärkerkette (in 1 dB-Schritten von 0 bis -6 dB) systematisch erhöht und jeweils die Empfängerrauschtemperatur T_R sowie die zugehörige ZF-Rauschtemperatur T_{ZF} misst. Trägt man T_R gegen T_{ZF} auf, so ergibt sich eine Gerade aus der man nach Gleichung (6) T_M und L bestimmen kann (Diagramm plus rechnerische Geradenanpassung mit Fehlerbetrachtung).

Aufgabe 5: Bestimmung von T_R mit Hornantenne und Abschlusswiderstand

Man bestimme noch einmal die Empfängerrauschtemperatur bei der optimalen Einstellung für die LO-Leistung und bei optimaler Position für den ZF-Filter mit folgenden Methoden:

A. Mit Hilfe der Hornantenne am Eingang des Radiometers, gerichtet auf Absorbermaterial einmal bei Raumtemperatur (293 K) und einmal auf 77 K abgekühlt. Bei der Messung mit flüssigem Stickstoff ist darauf zu achten, dass das Absorbermaterial vollständig in den Stickstoff eingetaucht ist. Die Messung mit flüssigem Stickstoff soll einmal mit reflektierender Metallunterlage unter dem Absorber und einmal ohne gemacht werden. Wie sind die Unterschiede im Messergebnis zu erklären?

B. Mit Hilfe des Abschlusswiderstands am Eingang des Radiometers (ebenfalls bei Raumtemperatur und 77 K)

6. Wichtige Hinweise zur schriftlichen Auswertung

- Messprotokoll muss mit abgegeben werden!
- Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus pro Versuchsteil
- Komplette Fehlerrechnung
- Diskussion der Messergebnisse
- E-mail-Anschriften in Auswertung angeben

7. Literatur

Hachenberg, O., Vowinkel, B.: Technische Grundlagen der Radioastronomie. BI, 1982
(Auszug des Buches kann vom Betreuer ausgeliehen werden)

K. Rohlfs, T. Wilson: Tools of Radio Astronomy. 3rd Edition, Springer-Verlag 2000

Literatur aus der Bibliothek der Physikalischen Institute (Kategorien EE und EXP)

Die Funktionsweise eines SIS-Mischers ist auch auf unserer Institutshomepage http://www.ph1.uni-koeln.de/micro/deutsch/sdm_d.html erklärt (SFB 494, Arbeitsgruppe *Superconducting Devices and Mixers*).

Anhang A: Formeln

Das in der HF-Technik benutzte logarithmische Leistungsverhältnis der Ausgangsleistung P_2 zur Eingangsleistung P_1 in Dezibel (dB) ist wie folgt definiert:

$$\text{dB} \equiv 10 \log (P_2/P_1)$$

Ebenso werden Leistungsangaben logarithmisch in der Einheit dBm angeben:

$$\text{dBm} \equiv 10 \log (P/1\text{mW}) \quad \text{mit } P \text{ in mW}$$

Damit entsprechen z. B. $0 \text{ dBm} \equiv 1\text{mW}$

Die Rauschzahl F [dB] wird häufig anstelle der Rauschtemperatur T [K] verwendet. Sie ist definiert über:

$$F = 10 \log \left(1 + \frac{T}{T_0} \right) \text{ in [dB]}$$

Dabei ist T die Rauschtemperatur des Messobjekts und T_0 (293 K) die Raumtemperatur.

Für das Excess Noise Ratio (ENR) [dB] einer Rauschquelle gilt:

$$\text{ENR} = 10 \log \left(\frac{T_E}{T_0} \right) \text{ in [dB]}$$

mit der Rauschtemperatur der Quelle T_E und der Raumtemperatur T_0 (293 K).

Anhang B: Auflistung aller Bauteile / Geräte

Bauteil / Gerät	Kenndaten		Info
Mischer Mini-Circuits ZMX-10G	v_{RF} v_{IF} max. P_{LO} max. P_{RF}	3.7 – 10 GHz DC – 2 GHz +7 dBm +1 dBm	Spannungsversorgung: +5 V
Lokalszillator (Transistortyp), Eigenbau	v P	9.6 GHz 4.34 mW (29.8 mW)	Spannungsversorgung: +5 V, –8 dB Dämpfungsglied am Ausgang
HF-Leistungsmessgerät HP 436A Powermeter	P	1 μ W – 100 mW	
HF-Messkopf HP 8481 A	v P	0.01 – 18 GHz 1 μ W – 100 mW	
Rauschdiode HP 346 B	v ENR	0.01 – 18 GHz +15.1 dB (@ 10 GHz)	+ 28 V Spannungsversorgung
ZF-Verstärkerkette, Eigenbau	v $G_{total}(ZF)$ $G(V1)$ $G(V2)$	5 – 400 MHz +74 dB +60 dB +17 dB	+15 V Spannungsversorgung -3 dB zwischen V1 und V2
Bandpassfilter Telemeter Electronic GmbH	Δv	100 – 200 MHz (100MHz Band- breite)	
Dämpfungsglieder	-1 dB -2 dB -3 dB -5 dB	2× 1× 1× 1×	
Spannungsquelle 1		+5 V, +15 V	farbig kodiert
Spannungsquelle 2		\pm 15 V	für Rauschdiode

Außerdem gibt es eine Hornantenne, einen 50 Ω Abschlusswiderstand (inkl. Verlängerungsstück), einen Styroporbehälter, einen 5/16 Zoll Maulschlüssel und schließlich Absorbiermaterial (als Load für die Antennenmessung).