

**Zur Methodik und Technik
radioastronomischer Messungen. Erfahrungsbericht
über das 25-m-Radioteleskop der Sternwarte Bonn**

**Technische und astronomische Messungen mit dem
Bonner 25-m-Radioteleskop**

Von P.-G. Mezger

**Die Positionsgenauigkeit des 25-m-Radioteleskops
der Sternwarte Bonn**

Von B.-H. Grahl

SONDERDRUCK aus TELEFUNKEN-ZEITUNG

P.-G. MEZGER : JAHRGANG 31 · (DEZEMBER 1958) · HEFT 122 · S. 213 — 223

JAHRGANG 32 · (MÄRZ 1959) · HEFT 123 · S. 38 — 46

B.-H. GRAHL : JAHRGANG 31 · (DEZEMBER 1958) · HEFT 122 · S. 226 — 232

Abridgments

Technical and Astronomical Measurements with the 25 m Radio Telescope of Bonn University

By P. G. Mezger

The 25 m radio telescope of the Bonn University Observatory was constructed in two years' building time on Mount Stockert, a peak on the Eastern border of the Eifel mountain range, under the technical supervision of Telefunken. After the inauguration in September 1956 approximately a year elapsed before the mechanical and electrical adjustments could be completed. In January 1958 several series of radio-astronomical measurements were commenced.

The RF receiver of the Bonn radio-telescope is designed mainly for observing the 21 cm line radiation of the interstellar hydrogen but observations of the continuum cosmic radiation are also possible. A novel discontinuous frequency scanning was developed for analysing the frequency scanning. As with all such type receivers, or expressed exactly, RF spectrometers, also in this radio telescope a differential measuring procedure is employed by comparing the radiation within the line-band (measuring channel) with the radiation outside the line-band (zero channel). Whilst the zero channel frequency is fixed, the measuring channel frequency is altered in steps and the initial conditions are restored after each step. This has the advantage that the formation of measuring value averages, arising from integration over certain periods of time, is independent of the previous measuring values. The difference between constant scanning and scanning by the steps can be seen from Figs. 3 and 4. The size of the individual steps (frequency hops) can be adapted to the structure of the line profile.

Special value was attached to absolute radiation measurements. For this the receiver must be carefully calibrated with a heatable resistance and a noise diode, which are connected to the receiver input via a directional coupler. The circuit of the whole equipment can be seen from Fig. 6, and Fig. 7 gives a survey of the whole equipment. In Fig. 7 are shown: 1, dipole, 2, coaxial cable of extremely low attenuation, 3, measuring cabin with receiver input section (Fig. 8), 4, tilt axis, 5 and 6, tilt and rotation angle gears, 7, vertical shaft, 8, ball-bearing, 9, adjustable pivot bearing, 10, cross slides, 11, main amplifier, pilot frequency generator, and evaluation equipments (Fig. 9), 12, high-tension transformer and switch, 13, servo control and voltage regulator.

In extended series of measurements the receiver stability was examined first of all, the stability of the receiver sensitivity being better than $\pm 2\%$. In one hour the gain varied by approx. $6 \cdot 10^{-4}$ only (Fig. 11). A basic limit for the radio telescope sensitivity is probably given by the thermal radio radiation of the atmosphere, but no observations are to hand concerning its time variations. Hitherto only especially strong interferences (immediately following thunderstorms) made themselves noticeable (Fig. 11).

For line measurements not only the gain must have a stability better than 1% but also the receiver's background noise in the line band, so that no line radiation of more than 1° K will be simulated. To obtain this the antenna, viewed from mixer head into antenna, must be excellently matched for the receiving frequency as well as the image frequency in the whole analysing range. In the Bonn equipment this is obtained simultaneously with the suppression of image frequencies and harmonics by means of the bridge filter and ferrite isolator, which converts the connection between antenna and receiver to a directional line. Not only the antenna pattern (Fig. 12), but also the absolute values of antenna gain and absorption area can be determined with the aid of cosmic radio sources.

The first observations of the continuum cosmic radiation dealt with the influence of the atmosphere and the thermal radio radiation of the earth on radio-astronomical observations. At smaller elevation angles numerous zero points are formed in the antenna pattern by interferences (Fig. 16a). Then also the attenuation of waves in the atmosphere becomes noticeable (Fig. 15a). The refraction causes an apparent position lift of a radio source lying near the horizon (Fig. 15c). In a range of angles of 2° the radiation emitted by the earth's surface also becomes noticeable (Fig. 17). Figs. 18 and 19 show examples of measurements of non-thermal and thermal radio sources. Since the flow of radiation of many radio sources is known exactly, on an absolutely calibrated receiver the absorption area and gain of directional antennas can be determined. Table 2 indicates the flow of radiation measured for Cas A in comparison with two other measurements. Similar measurements were made for further five strong radio sources in the Northern hemisphere.

The effect of various time constants at constant scanning speed is indicated by means of some tracking curves of Cas A (Fig. 20). The thermal radio radiation of the moon was determined as a function of the moon phase. A value of 250° K was measured whilst the theoretical value for the lower layers of the moon's surfaces is 245° K approximately. From this it can be concluded that at least the 21 cm radio radiation originates from the lower layers of the moon's surface. The first line measurements dealt with the distribution of interstellar hydrogen in a special sector of the Galaxy. With a receiver bandwidth of 30 kc/s the average measuring time of a line profile was two hours. If the receiver bandwidth is reduced to 15 kc/s then the measuring time must be doubled to obtain the same measuring accuracy. It was ascertained on several line profiles with particularly fine structure that, with 15 kc/s bandwidth, in no case fine details were determined, which could not be observed with 30 kc/s bandwidth. Absorption spectra (Figs. 22 and 23) were also recorded. As an example of extra-galactic line radiation the measurement of the nebula of Andromeda is shown (Fig. 24), an integration period of 12 minutes having been selected for each measuring point.

The Position Accuracy of the 25 m Radio Telescope of the Bonn Observatory

By B. H. Grahl

The accuracy, with which the radio telescope can take bearings on, and track the daily movement of an astronomical object, is dependent, above all, on the control of the parabolic antenna movement. Figs. 1a and 1b give a general view of this. If the position is given in equatorial coordinates a mechanical analogue computer (coordinate converter) converts this position into horizontal system coordinates (azimuth and elevation or rotation and tilt angles). When setting the telescope to these values a tracking control becomes operative. The actual position obtained is indicated on the control console in

to be continued p. 30
à continuer . . . p. 30

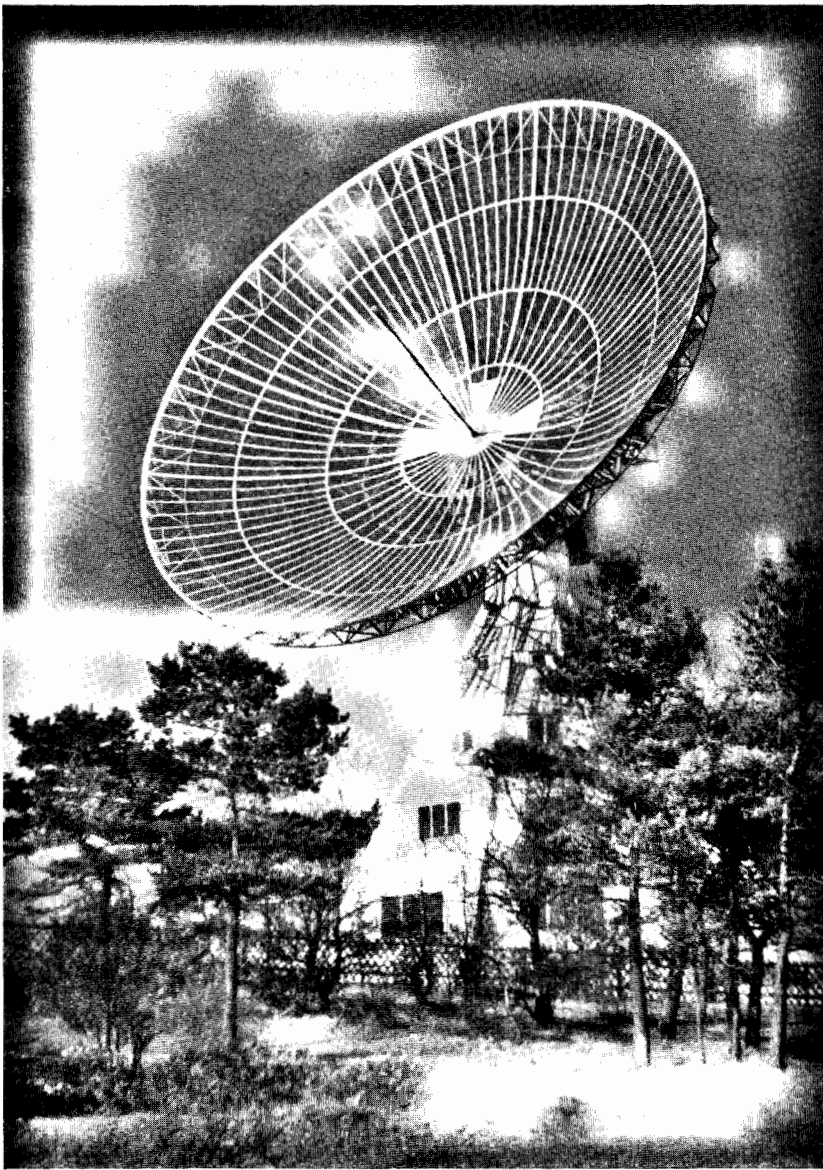


Bild 1: Das 25-m-Radioteleskop der Universitäts-Sternwarte Bonn auf dem Stockert

Technische und astronomische Messungen mit dem Bonner 25-m-Radioteleskop

Von P. G. Mezger

Der folgende Aufsatz ist von Herrn Dipl.-Phys. P. G. Mezger verfaßt, der als Mitarbeiter von Herrn Prof. Fr. Becker von der Universitätssternwarte Bonn schon in den Jahren 1955 und 1956 beauftragt war, an der Entwicklung des 25-m-Radioteleskops mitzuarbeiten. Er hat während dieser Zeit und auch in der anschließenden Periode der Inbetriebnahme des Teleskops viele wertvolle Anregungen gegeben. Für diese und für die folgenden Ausführungen sei deshalb auch hier gedankt. Die Schriftleitung

Nach zweijähriger Bauzeit wurde am 17. September 1956 das 25-m-Radioteleskop auf dem Stockert (Bild 1) der Universitäts-Sternwarte Bonn übergeben. An seinem Bau arbeiteten mehrere Unternehmen¹⁾ unter der technischen Oberleitung von Telefunken. Ein Heft der Telefunkenzeitung [1] war anlässlich der Einweihung des Bonner Radioteleskops ausschließlich der Radioastronomie gewidmet. In ihm wurden die technischen Anlagen, insbesondere die Hochfrequenzempfangsanlage [8], nach dem Stand der Entwicklung im Jahr 1956 beschrieben. Mit der Übergabe des Radioteleskops an die Universitäts-Sternwarte konnten jedoch die astronomischen Messungen keineswegs sofort beginnen, vielmehr mußte zunächst das Zusammenspiel der einzelnen Bauelemente zu einem leistungsfähigen Radioteleskop erreicht werden. Im Gegensatz zur Entwicklung im

¹⁾ AEG, Berlin (Energieversorgung und Folgeregelung); Alkett, Berlin (Maschinenanlagen); Metallwerke Friedrichshafen (Spiegel); Rademakers, Rotterdam (Koordinatenwandler).

Ausland konnten in Deutschland keine Erfahrungen mit kleinen Radioteleskopen und einfacheren Empfängern auf das 25-m-Teleskop mit seinem komplizierten HF-Spektrometer übertragen werden. So mußten wir ohne spezielle radioastronomische Erfahrungen innerhalb weniger Jahre den Anschluß an den internationalen Stand der Radioastronomie gewinnen. Diese Aufgabe ist dadurch zusätzlich erschwert, daß gerade die Beobachtungstechnik der 21-cm-Linie des interstellaren Wasserstoffs, die Hauptaufgabe des Bonner Radioteleskops, ständig weiterentwickelt und verbessert wird.

Das HF-Spektrometer des Bonner Radioteleskops wurde für einen Empfangsbereich von $1420,4 \pm 2,5$ MHz ($\lambda \sim 21$ cm) entwickelt. In diesem Band — und nur dort — setzt sich die kosmische Radiostrahlung aus zwei qualitativ völlig verschiedenen Komponenten zusammen: aus einer Radiostrahlung mit kontinuierlichem Spektrum, die sich über den ganzen, der radioastronomischen Beobachtung zugänglichen Wellenlängenbereich erstreckt (etwa 17 m bis 8 mm) und ihre Entstehung teils der thermischen Strahlung ionisierter Wasserstoffwolken, teils einem nichtthermischen Strahlungsmechanismus verdankt. Die zweite Strahlungskomponente ist eine Spektrallinie, die von kalten, interstellaren Wolken neutralen Wasserstoffs emittiert wird. Die exakte Frequenz dieser Spektrallinie liegt bei 1420,405 MHz, und ihre Halbwertsbreite beträgt etwa 7 kHz bei einer kinetischen Temperatur der interstellaren Wasserstoffwolken von etwas mehr als 100° K. Doch überlagern sich dieser thermischen Dopplerverbreiterung der Spektrallinie noch weitere Dopplereffekte, die teils zu einer zusätzlichen Verbreiterung der Linie durch statistische Bewegung, teils zu einer Verschiebung der eigentlichen Linienfrequenz durch Bewegungen der interstellaren Wasserstoffwolken relativ zum Sonnensystem führen. An Stelle einer einzelnen Spektrallinie findet man daher Linienprofile, die aus der Überlagerung mehrerer, gegeneinander verschobener Einzellinien entstehen (Bild 2, 3 und 4). Entsprechend den größten, innerhalb unseres Milchstraßensystems auftretenden Rotationsgeschwindigkeiten, ist eine galaktische Linienstrahlung allenfalls im Bereich $1420,4 \pm 1,5$ MHz zu erwarten. Der Empfänger des Bonner Radioteleskops wurde nun so ausgelegt, daß damit sowohl die Linienstrahlung als auch die Kontinuumstrahlung außerhalb des 21-cm-Bandes gemessen werden kann. Da der Kontinuumempfang einfacher ist, befaßten sich die ersten, mit dem Bonner Radioteleskop ausgeführten Messungen mit der kontinuierlichen Radiostrahlung. Im Frühjahr 1957 registrierten wir die ersten Durchlaufkurven einiger starker Radioquellen. Hierüber wird in Kapitel B dieser Arbeit berichtet.

Parallel mit der Fertigstellung der HF-Empfangsanlage liefen die Arbeiten an der Maschinenanlage des Radioteleskops, die schließlich im Sommer 1957 abgeschlossen werden konnten. Im Oktober desselben Jahres wurde der Koordinatenwandler — ein elektromechanischer Analogrechner, der die äquatorialen Koordinaten eines Himmelspunktes als Funktion der Zeit in das azimutale Koordinatensystem des Radioteleskops umrechnet — geliefert und an die elektronische Folgeregelung des Teleskops angeschlossen [2]. Erst mit dieser Lieferung wurde eine sinnvolle Messung von Linienprofilen möglich, denn während der Messung eines Profils, die etwa zwei Stunden dauert, muß die Antenne immer den gleichen Himmelspunkt anvisieren.

Gegen Ende des Jahres 1957 kamen auch die Arbeiten an dem Linienempfänger so weit zum Abschluß, daß mit der Messung von Linienprofilen begonnen werden konnte. In einer größeren Meßreihe wurde der Sektor von 100° bis 120° galaktischer Länge in verschiedenen galaktischen Breiten durchmusteret. Kleinere

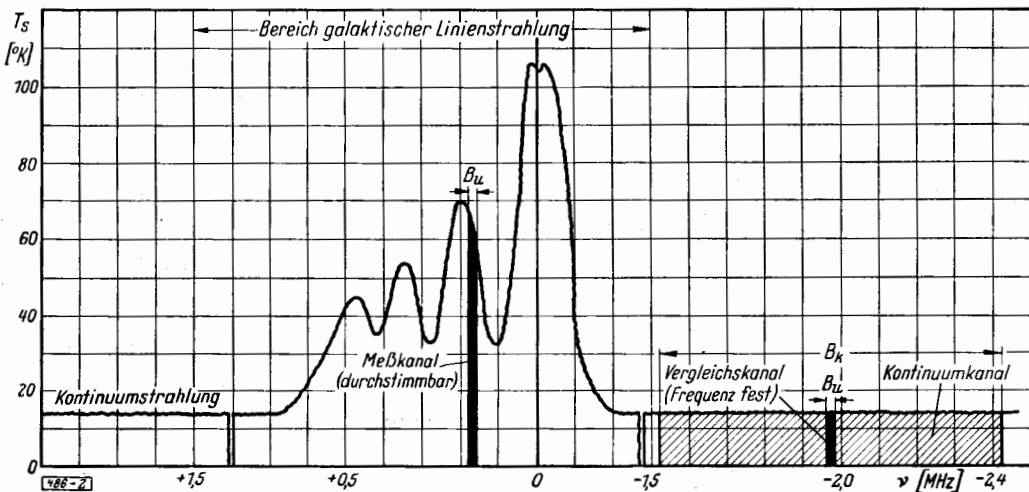


Bild 2: Qualitatives Bild eines Linienprofils.

Die Linienstrahlung überlagert sich einer Kontinuumstrahlung annähernd konstanter Strahlungstemperatur. Die Bandbreite des Kontinuumverstärkers ist $B_K = 0,9$ MHz, des Linienverstärkers $B_L = 30,15$ und 5 kHz, wahlweise einstellbar

Meßreihen — wie spezielle Absorptionsspektren, Meridionalschnitte senkrecht zur galaktischen Ebene, einzelne Profile des Andromedanebels — dienen sowohl der Kontrolle der Leistungsfähigkeit unserer Anlage als auch zur Vorbereitung späterer astronomischer Messungen. Eine kurze Übersicht über diese Arbeiten geben wir im Abschnitt B 2. Ganz besondere Aufmerksamkeit wurde dem Problem der Absoluteichung der Antenne gewidmet (A 3), durch die erst die exakte Umrechnung einer gemessenen Antennentemperatur in den absoluten Strahlungsfluß der Radioquelle bzw. in die wahre Strahlungstemperatur einer flächenhaften Wasserstoffwolke möglich wird.

A. Technische Messungen

Die Eigenschaften der Empfangsanlage wurden in verschiedenen Meßreihen untersucht, die sich über etwa ein Jahr hinzogen. Sie befaßten sich vor allem mit der Konstanz des Empfängers; den wesentlichen Aufschluß über Energie- und Frequenzauflösungsvermögen eines Radioteleskops können nur die astronomischen Messungen geben, über die wir im Teil B der Arbeit berichten werden.

1. Meßverfahren

Die Linienstrahlung des interstellaren Wasserstoffes überlagert sich einer Kontinuumstrahlung, deren Strahlungstemperatur im 21-cm-Band praktisch konstant ist.

a) Das Differenzmeßverfahren zur Beobachtung der kosmischen Linienstrahlung

Alle Empfänger — oder exakter ausgedrückt, HF-Spektrometer — zur Beobachtung der interstellaren Linienstrahlung arbeiten nach einem Differenzmeßverfahren, das die Strahlungstemperatur innerhalb des Linienbandes mit der Strahlungstemperatur des Kontinuums außerhalb des Linienbandes vergleicht (Bild 2). Ein Linienempfänger hat daher (mindestens) einen Meßkanal innerhalb des Linienbandes und einen Null- oder Vergleichskanal außerhalb des Linienbandes. Bei diesem Differenzmeßverfahren wird der Unterschied der Strahlungstemperatur der Linie von der Strahlungstemperatur des Kontinuums gemessen. In den meisten Fällen ist die Strahlungstemperatur der Linie höher, man beobachtet also eine Emissionslinie; doch tritt in speziellen Fällen die 21-cm-Linie auch als Absorptionslinie auf.

Für die Beurteilung eines Linien-spektrometers sind zwei Kriterien wesentlich: Wie der Vergleich der

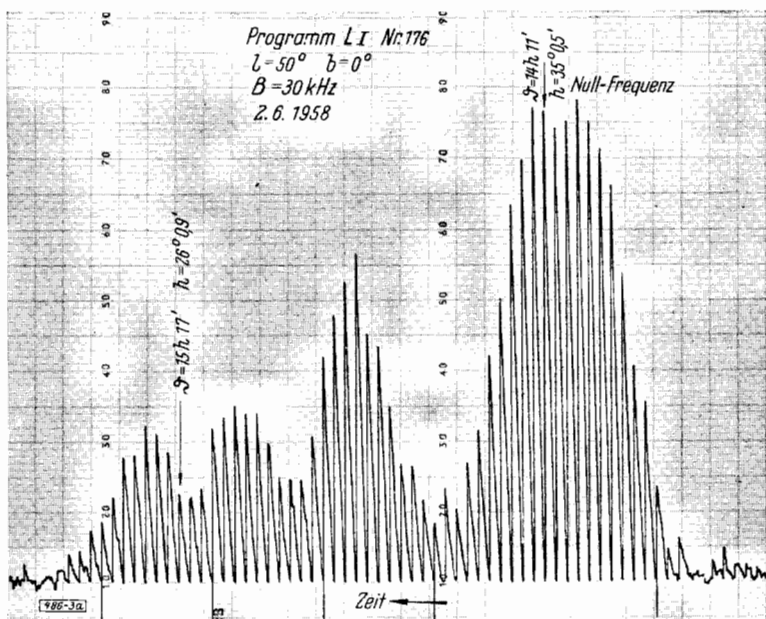


Bild 3a: Registrierung des Profils $l = 50^\circ$, $b = 0^\circ$ mit dem Bonner 25-m-Teleskop. $B_u = 30$ kHz, $t_m = 2$ min, Frequenzschritte $D = 11,5$ kHz. Die mit „Zeit“ bezeichnete Abszisse ist gleichzeitig ein Maß für die Frequenz.

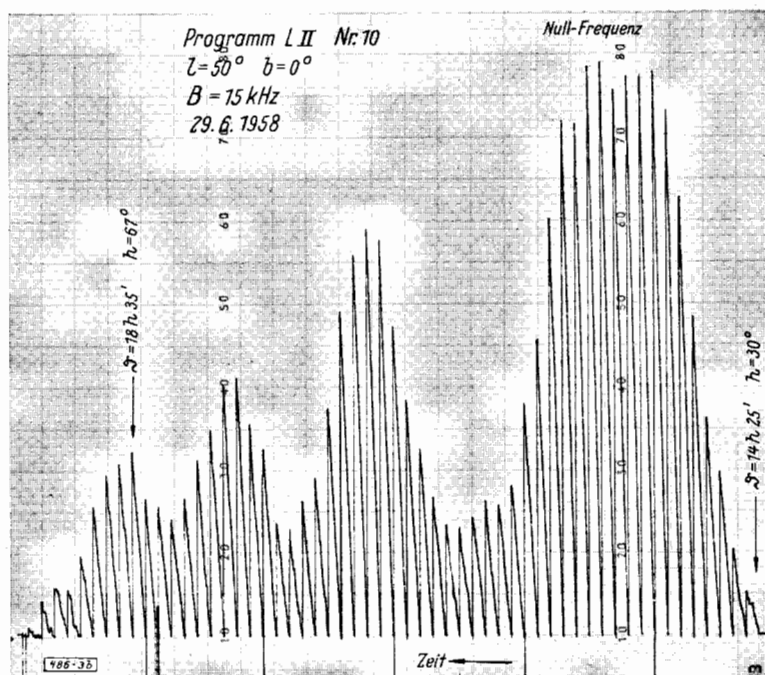


Bild 3b: Registrierung des Profils $l = 50^\circ$, $b = 0^\circ$ mit dem Bonner 25-m-Teleskop. $B_u = 15$ kHz, $t_m = 4$ min, $D = 11,5$ kHz. Die mit „Zeit“ bezeichnete Abszisse ist gleichzeitig ein Maß für die Frequenz.

Strahlungstemperaturen in Null- und Meßkanal technisch realisiert und in welcher Weise das Linienprofil abgetastet wird. In dem Bonner Linienempfänger erfolgt die Differenzbildung durch Umtasten der Oszillatorfrequenz²⁾, wobei die Frequenz des Nullkanals festliegt, während der Meßkanal durchgestimmt werden kann. Bild 2 ist die qualitative Darstellung eines Linienprofils. Die Umtastung der Oszillatorfrequenz auf Meß- bzw. Vergleichskanal erfolgt mit 500 Hz. Sämtliche Impuls- und Oszillatorfrequenzen werden von einem hochstabilisierten Quarzoszillator abgeleitet. Hinter der 1. ZF-Stufe (Blockschaltbild 6 auf S. 218) gabelt sich der ZF-Verstärker in Linien- und Kontinuumkanal. Soll Kontinuum- und Linienstrahlung gleichzeitig beobachtet werden, so wird der Kontinuumkanal des ZF-Verstärkers während derjenigen Zeit ausgetastet, während der der Oszillator auf „Meßkanal“ geschaltet ist. Die Bandbreite des Kontinuumkanals beträgt 0,9 MHz, die Bandbreite des Linienkanals wird mit einem umschaltbaren Quarzfilter wahlweise auf 30, 15 oder 5 kHz eingestellt.

Anstatt den Meßkanal kontinuierlich durchzustimmen und die Rauschspannung am Ausgang des Phasendetektors in einem Tiefpaß großer Zeitkonstante zu mitteln (dieses Verfahren wird z. B. in dem holländischen Linienempfänger angewendet [3]), stellt bei dem hier beschriebenen Linienempfänger ein Programmschaltwerk eine feste Empfangsfrequenz ein. Die gleichgerichtete Rauschspannung am Ausgang des Phasendetektors wird dann während einer bestimmten Meßzeit integriert; am Ende der Integrationszeit wird der Integrator-eingang kurzgeschlossen. Darauf schaltet das Programmschaltwerk die Empfangsfrequenz einen Schritt weiter, und der Integrationsvorgang beginnt von neuem. Bild 3 zeigt Originalregistrierungen des Profils $l = 50^\circ$, $b = 0^\circ$ des Bonner 25-m-Teleskops mit verschiedenen Bandbreiten (30 und 15 kHz). Man erkennt deutlich die Integration (schräg ansteigender Teil eines Meßvorgangs) und die darauffolgende Rückschaltung des Integrators auf Null. Der Endpunkt einer Integrationskurve ist somit ein Maß für die entsprechende Linientemperatur. Eine eingehende Analyse dieses Meßverfahrens wird in [4] gegeben. Bild 4 zeigt die Originalregistrierungen desselben Profils, die bei 40 bzw. 20 kHz Bandbreite mit dem 25-m-Teleskop der Universitäts-Sternwarte Leiden gemessen wurden³⁾; der holländische Linienempfänger tastet das Linienprofil kontinuierlich ab, was an der stetigen Meßkurve zu sehen ist. Die geraden Striche sind lediglich Frequenzmarken.

Die wesentlichen Vorteile einer diskontinuierlichen Abtastung liegen in der kürzesten Meßzeit für ein Profil bei sonst gleichen Empfängereigenschaften und in der völligen Verzerrungsfreiheit der gemessenen Profile. Dagegen verzerrt bei kontinuierlicher Abtastung der Tiefpaß am Ausgang des Phasengleichrichters ein so gemessenes Linienprofil, wenn für die Abtastgeschwindigkeit v nicht die Bedingung

$$v \leq 0,25 B/\tau \text{ mit } B = \text{Bandbreite des Empfängers und } \tau = \text{Zeitkonstante des Tiefpasses} \quad (1)$$

eingehalten wird [5]. Besonders bei der Beobachtung von Absorptionslinien mit sehr kleinen Empfängerbandbreiten sowie bei der Beobachtung extragalaktischer Linienstrahlung mit sehr langen Integrationszeiten ist die Verzerrungsfreiheit der diskontinuierlichen Profilabtastung vorteilhaft. Die Lochstreifensteuerung des Programmschaltwerks erlaubt eine beliebige Wahl der Frequenzschritte; strukturreiche Teile eines Profils können daher in sehr kleinen Frequenzschritten analysiert werden, während man etwa die sehr langen Flügel einzelner Profile in größeren Schritten registrieren wird.

b) Das Direktmeßverfahren zur Beobachtung der kontinuierlichen kosmischen Radiostrahlung

Die von der Antenne aufgenommene und dem Empfängereingang zugeführte schwache kosmische Radiostrahlung überlagert sich dem Empfängereigenrauschen, dessen Rauschtemperatur bei 1420 MHz im allgemeinen um rund zwei Größenordnungen höher ist als die äquivalente Antennentemperatur der kosmischen Kontinuumstrahlung. Empfängereigenrauschen und kosmische Radiostrahlung, die ebenfalls Rauschcharakter hat, werden gemeinsam verstärkt, an einem linearen Gleichrichter demoduliert und in einem RC-Tiefpaß gemittelt. Die der Eigenrauschetemperatur T_e entsprechende mittlere Gleichspannung u_e (im Bonner Kontinuumempfänger etwa 6 Volt) wird bis auf einen geringen Rest mit einer sehr stabilen Gleichspannung kompensiert. Eine Erhöhung der Antennentemperatur wird dann mit einem empfindlichen Schreiber als kleine Erhöhung der Spannung am Gleichrichter registriert. Bild 5 ist die typische Kontinuumregistrierung eines Durchlaufs der Milchstraße bei niedriger Elevation.

²⁾ Dieses spezielle Meßverfahren durch Oszillatortastung wurde von C. A. Muller [3] beschrieben. Während Entwicklung und Bau des Bonner Radioteleskops unterstützten uns die Herren Ing. Hooghoudt und Dr. C. A. Muller durch Mitteilung ihrer Erfahrungen in großzügiger Weise.

³⁾ Diese Registrierungen wurden uns von Herrn Dr. Westerhout freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

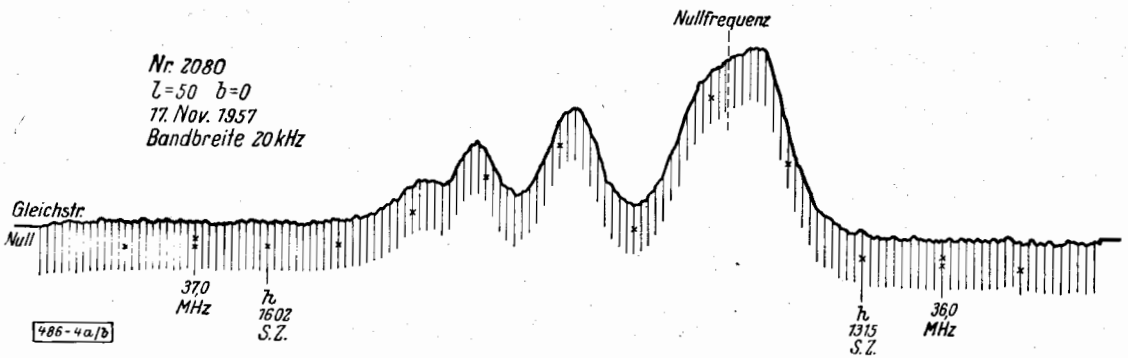


Bild 4a: Registrierung des Profils $l = 50^\circ$, $b = 0^\circ$ mit dem Leidener 25-m-Teleskop, $B_u = 20$ kHz

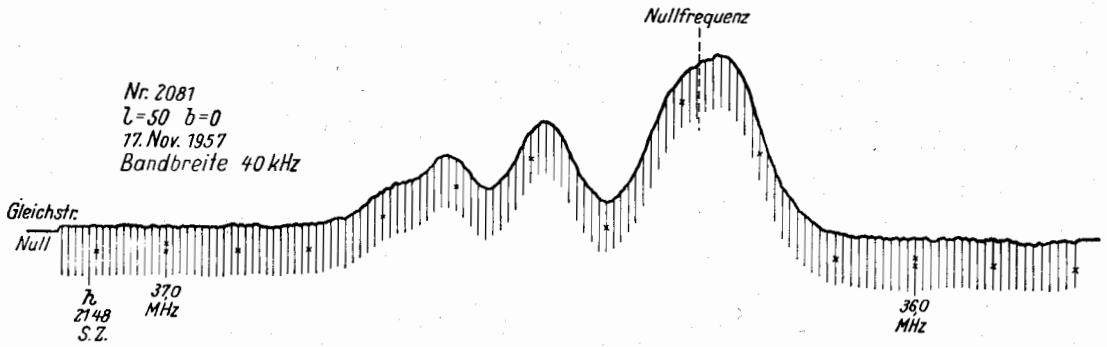


Bild 4b: Registrierung des Profils $l = 50^\circ$, $b = 0^\circ$ mit dem Leidener 25-m-Teleskop, $B_u = 40$ kHz

Langsame Verstärkungsänderungen gehen beim Direktmeßverfahren etwa hundertmal stärker in das Meßergebnis ein als beim Differenzmeßverfahren. Daher ist eine dauernde Nullpunktskontrolle des Verstärkers notwendig. Zu diesem Zweck wird die Antenne in zeitlichen Intervallen, die sich aus der angestrebten Meßgenauigkeit ergeben, auf einen Vergleichspunkt an der Sphäre gerichtet. Die Verbindungslinie durch diese Kontrollpunkte ergibt die Bezugslinie, von der aus die Meßwerte einer Registrierung gerechnet werden. Allgemein wird der Himmelspol als Bezugspunkt gewählt; da jedoch sehr viele Messungen im Süden gemacht werden, ginge bei einer solchen Vergleichsmessung zuviel Zeit verloren, denn das Bonner 25-m-Teleskop braucht für eine volle azimutale Drehung 6 Minuten. Deshalb wählt man zweckmäßigerweise zunächst einen naheliegenden Vergleichspunkt und reduziert dann auf die äquivalente Antennentemperatur des Himmelspols.

c) Eichung der Antennentemperatur in Kontinuum- und Linienempfänger

Eine mit einem Radioteleskop beobachtete Strahlungsintensität wird durch ihre äquivalente Antennentemperatur T_A ausgedrückt, deren physikalische Interpretation einfach ist: ein an Stelle der Antenne auf den Empfängereingang geschalteter gleichgroßer Widerstand müßte die Temperatur T_A °K haben, damit am Empfängerausgang die gleiche Spannungserhöhung registriert wird. Dieser Gedanke liegt auch der von

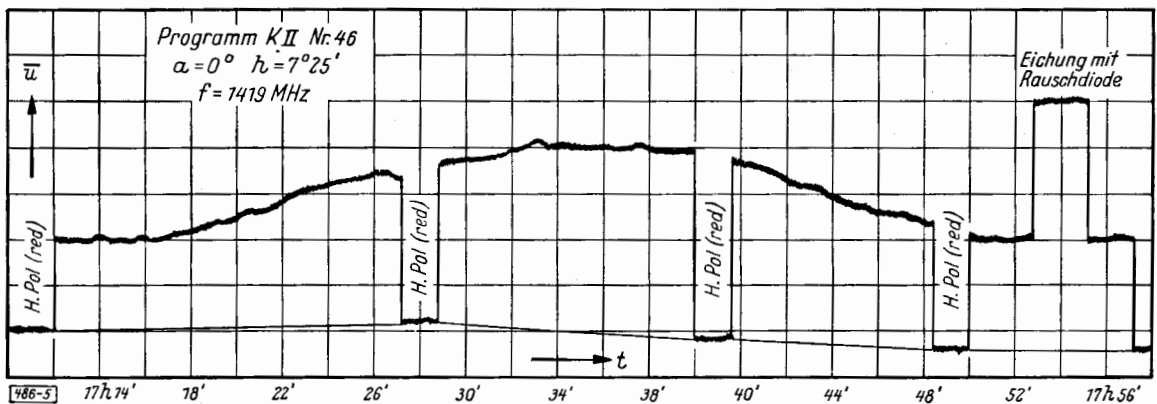


Bild 5: Kontinuumregistrierung eines Durchlaufs der Milchstraße bei niedriger Elevation. Die Bemerkung H. Pol (red) bedeutet, daß zur Kontrolle der Empfängernulllinie ein naheliegender Vergleichspunkt gewählt wurde, der anschließend auf die äquivalente Antennentemperatur des Himmelspols reduziert wird

uns verwendeten Eichmethode mit einem heizbaren Absorber zugrunde, bei der eine bekannte Differenz der Rauschtemperaturen zweier angepaßter Absorber (etwa 60°K) als Temperaturnormal verwendet wird. Diese physikalisch einfache und übersichtliche Eichmethode hat jedoch den prinzipiellen Nachteil, daß der Empfänger nicht in seinem Arbeitspunkt ($T_A \approx 0^\circ\text{K}$), sondern im Punkt $T_A = T_0$ (Temperatur des kühleren Vergleichsabsorbers) seiner Temperatur-Spannungs-Charakteristik geeicht wird.

Diese grundsätzliche Schwierigkeit kann man umgehen, wenn man eine Rauschdiode über einen Richtkoppler auf den Empfängereingang schaltet. Dann wird zunächst die Rauschdiode mit dem an Stelle der Antenne auf den Empfänger geschalteten heizbaren Absorber geeicht, wobei die Temperatur-Spannungs-Charakteristik nicht in die Messungen eingeht. Zur Empfängereichung wird die auf den Himmelspol gerichtete Antenne auf den Empfänger geschaltet und nun mit der Rauschdiode eine bekannte kleine Rauschleistung auf den Empfängereingang gegeben. Eine eingehende Beschreibung dieses Eichverfahrens findet sich in [6]. Fehler, die sich bei der Eichung mit heizbarem Absorber schon bei kleinen Differenzen in der Anpassung der beiden Vergleichsabsorber ergeben könnten [7], werden durch einen Ferrit-Isolator (Richtungsleitung), der der Mischstufe vorgeschaltet ist, erheblich reduziert. Für die genaue Absolutmessung von Strahlungsleistungen ist u. E. bei Überlagerungsempfängern eine Vorselektion vor der Mischstufe notwendig, da Spiegel- und Oberwellenempfang die physikalischen Verhältnisse sonst schwer übersehbar machen.

Zur Eichung des Linienempfängers muß die Rauschdiode im Takt der Umschaltfrequenz des Oszillators ausgetastet werden, entweder während des Empfanges des Kontinuums oder während des Empfanges der Spektrallinie. Wir haben uns für die zweite Möglichkeit entschlossen, da die Koppeldämpfung des Richtkopplers etwas frequenzabhängig ist. Das Eichsignal wird daher vom Empfänger als negative Temperaturdifferenz registriert.

2. Der Empfänger

Eine eingehende Beschreibung der technischen Einzelheiten der Bonner 21-cm-Empfangsanlage nach dem Entwicklungsstand vom September 1956 findet sich in [1] und [8]. Demgegenüber ist der Eingangsteil des Empfängers inzwischen in einigen wesentlichen Punkten weiterentwickelt worden, welche besondere Bedeutung für die Linienmessung haben [9].

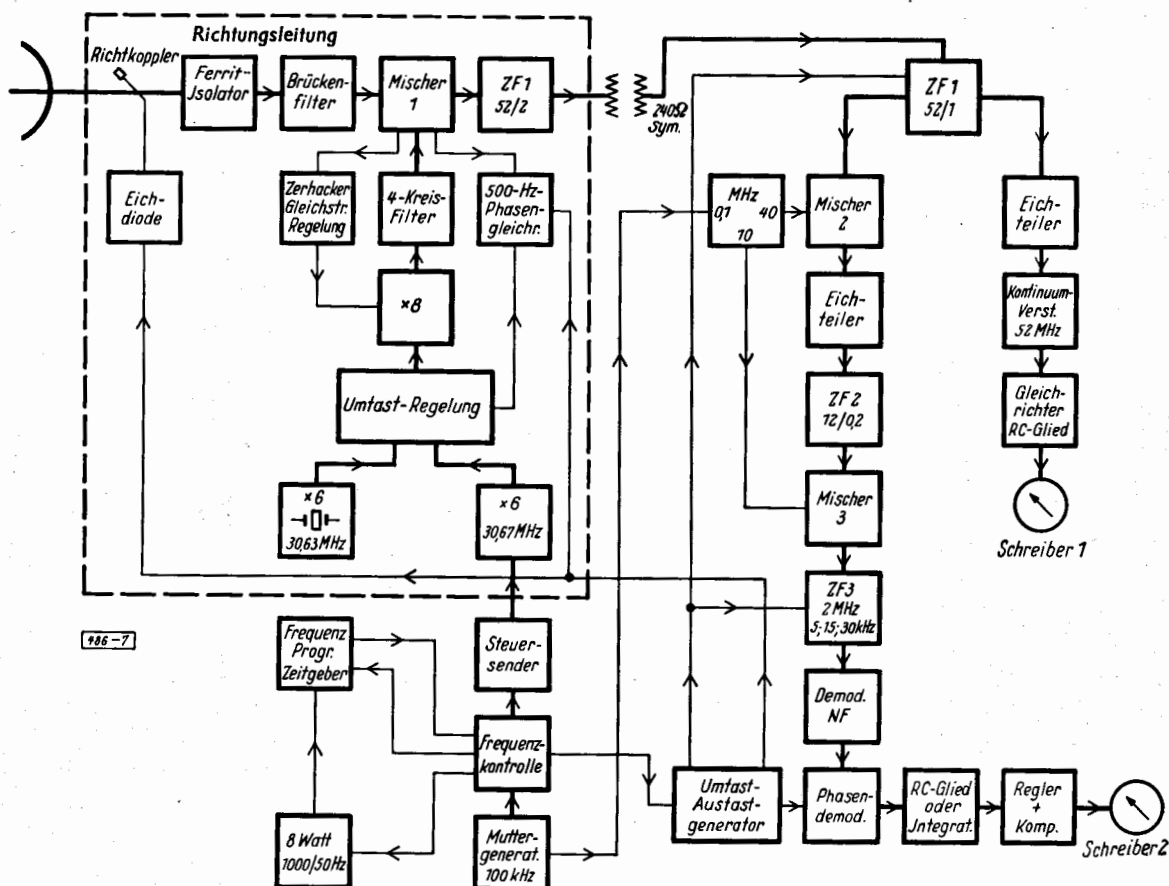
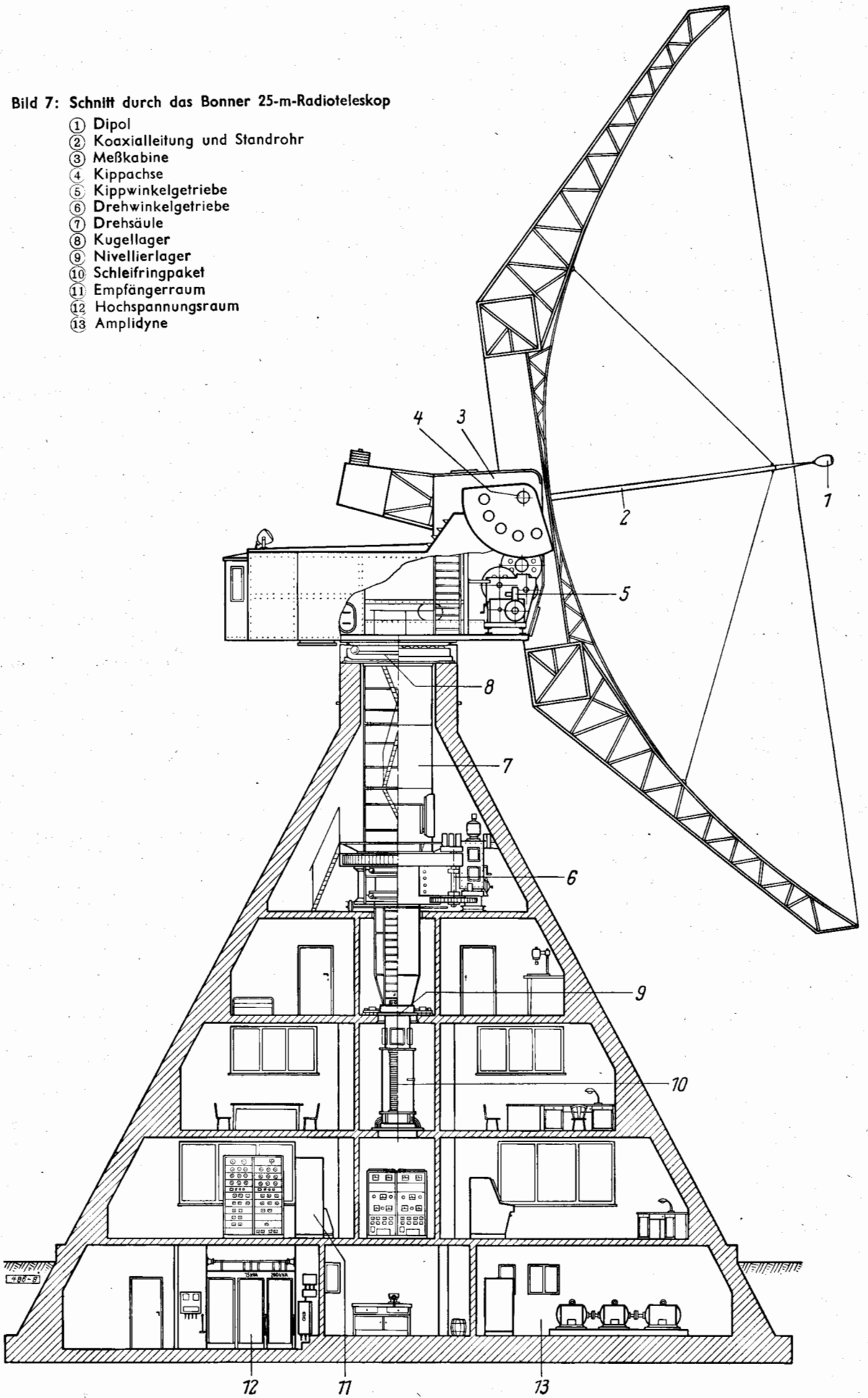


Bild 6: Blockschaftbild der gesamten HF-Anlage des Bonner Radioteleskops

Bild 7: Schnitt durch das Bonner 25-m-Radioteleskop

- ① Dipol
- ② Koaxialleitung und Standrohr
- ③ Meßkabine
- ④ Kippachse
- ⑤ Kippwinkelgetriebe
- ⑥ Drehwinkelgetriebe
- ⑦ Drehsäule
- ⑧ Kugellager
- ⑨ Nivellierlager
- ⑩ Schleifringpaket
- ⑪ Empfängerraum
- ⑫ Hochspannungsraum
- ⑬ Amplidyne



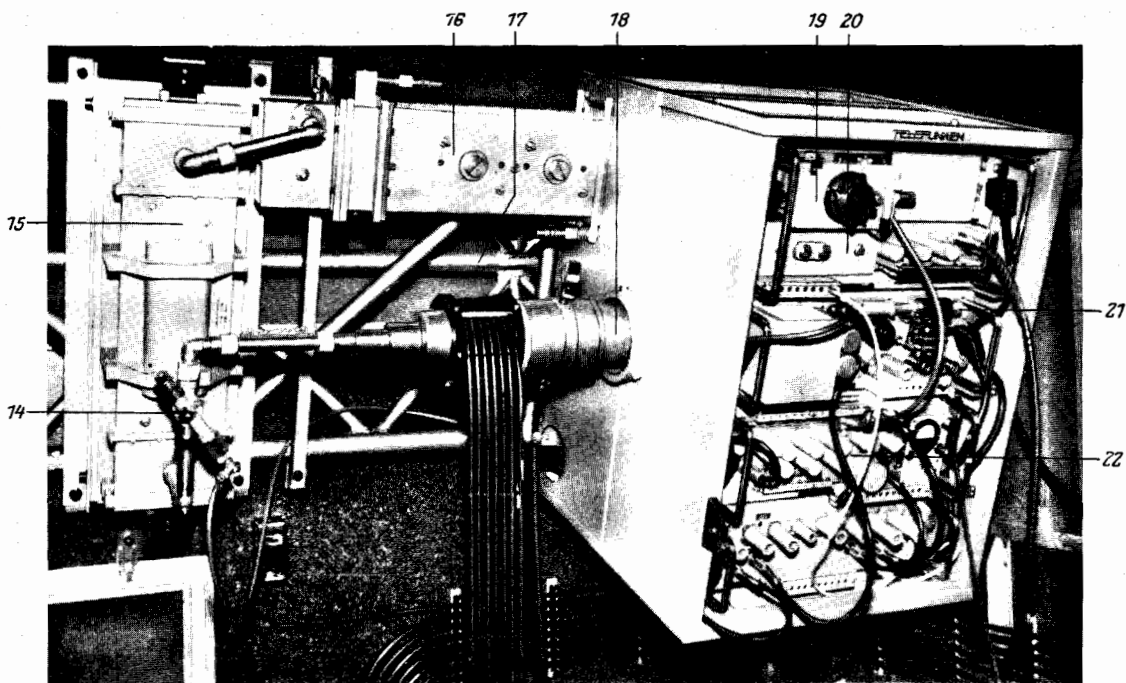


Bild 8: Eingangsteil der Bonner 21-cm-Empfangsanlage.

Alle Teile sind auf einem Träger montiert, der fest mit dem Spiegel verbunden ist

- | | |
|--|--|
| ⑭ Richtkoppler für Rauschdiodeinkopplung | ⑲ Letzte Vervielfacherstufe |
| ⑮ Richtungsleitung zur Unterdrückung von Reflexionen | ⑳ Mischstufe |
| ⑯ Brückenfilter | ㉑ Rauschdiode |
| ⑰ Montageträger | ㉒ Vervielfacher für Null- und Meßkanaloszillator |
| ⑱ Antennenkoaxialleitung | |

Bild 6 zeigt das Blockschaltbild der Gesamtanlage. Seit September 1956 sind folgende Bausteine neu hinzugekommen: Richtungsleitung und Brückenfilter im Eingang, ein nach dem Zerhackerprinzip arbeitender Gleichstromverstärker zum Konstanthalten der Aussteuerung des Mischdetektors sowie ein zweites Registrierinstrument mit Kompensationseinrichtung. Der Einbau der HF-Anlage in das Radioteleskop ist aus der Schnittzeichnung Bild 7 gut zu ersehen. Der Dipol ①, der durch eine Kunststoffhaube vor Witterungseinflüssen geschützt wird, ist über eine starre, extrem dämpfungsarme Koaxialleitung ② mit dem Empfängereingangsteil verbunden. Dieses Eingangsteil — im Blockschaltbild 7 durch eine gestrichelte Umrandung gekennzeichnet — ist auf einem Träger in der Meßkabine ③ montiert, der starr mit dem Spiegel verbunden ist, sich also mit der Kippachse ④ des Spiegels dreht. In Bild 8 erkennt man die Anordnung der einzelnen Dezimeterwellen-Bauelemente. Der Spiegel wird über Kipp- ⑤ bzw. Drehwinkelgetriebe ⑥ verstellt, die senkrechte Drehachse des Teleskops ⑦ durch das Schulterkugellager ⑧ und durch das mittels Kreuzschlittens justierbare Halskugellager ⑨ gehalten. Damit das Teleskop beliebig oft in einer Richtung gedreht werden kann, werden sämtliche Leitungen über Schleifringe ⑩ geführt. Am unteren Ende des Schleifringpakets befindet sich ein Drehübertrager für das symmetrische ZF-Kabel und ein stoßstellenarmer Schleifringsatz für die Kabel der Oszillatorsteuerfrequenz und 500-Hz-Schaltimpulse.

Haupt-ZF-Verstärker, Steuerfrequenzgenerator und Auswerteteil der HF-Anlage befinden sich im Empfängerraum ⑪. Die getrennte Führung von Kontinuum- und Linien-ZF-Kanal (Bild 6) und die Verbindung fast aller ZF-Bauelemente durch 60-Ohm-Kabel erwies sich für Fehlersuche und Kontrollmessungen als besonders günstig, da die Bausteine leicht gegeneinander ausgetauscht oder durch Kabel überbrückt werden können. So gelingt es meist schnell, Fehlerquellen in den beiden ZF-Zügen zu lokalisieren.

Der elektronische Teil der Folgeregelung befindet sich ebenfalls im Empfängerraum (Bild 9 auf S. 221), so daß ein Mann von hier aus alle für astronomische Messungen notwendigen Anlagen bedienen kann. In den Kellerräumen sind die Hochspannungstransformatoren und Schalter ⑫, die Verstärkermaschinen für die Servosteuerung des Teleskops ⑬ und ein provisorisches Konstanthalteaggregat für die Netzspannung untergebracht.

a) Zeitliche Konstanz bei Kontinuummessungen

Die Wirkung zeitlicher Änderungen ist beim Direktmeßverfahren wesentlich leichter zu überblicken als beim Differenzmeßverfahren (A 1). Bei einer Eigenrauschttemperatur $T_e \sim 1600^\circ \text{K}$ wirkt sich eine Ver-

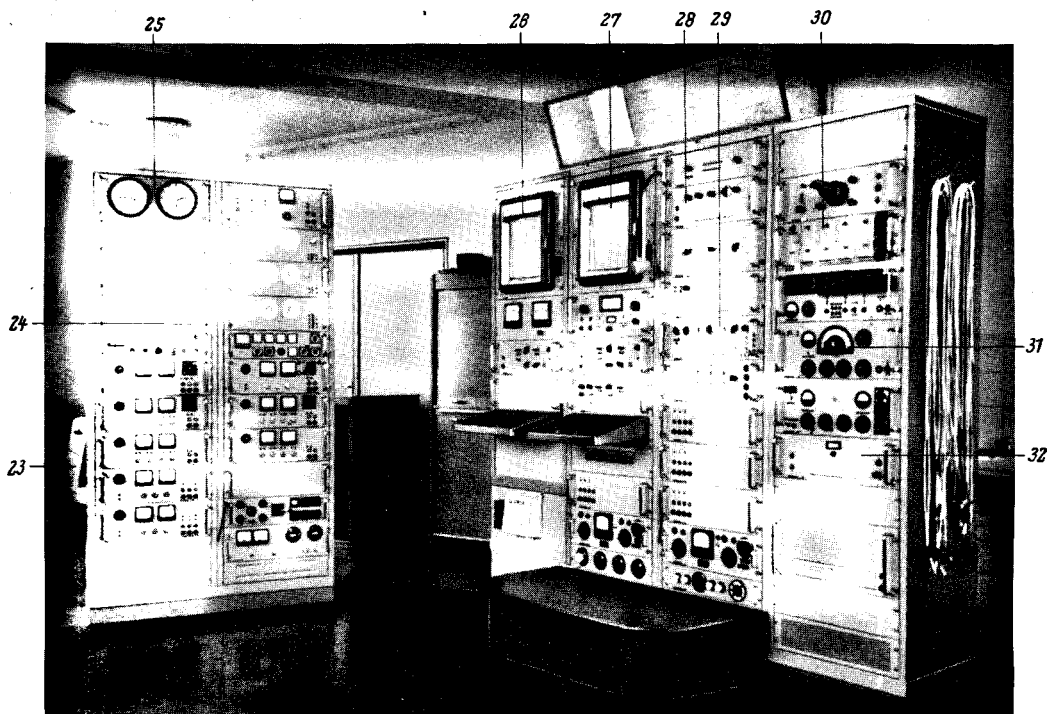


Bild 9: Empfängerraum des Bonner 25-m-Radioteleskops

- | | |
|---|---|
| ②③ Koordinatenwandler | ②⑨ Linien-ZF-Verstärker |
| ②④ Elektronischer Teil der Folgeregelung | ③⑩ Programmschaltwerk |
| ②⑤ Quarzgesteuerte Sonnen- und Sternzeituhr | ③① Steuerfrequenzoszillator |
| ②⑥ Kontinuumschreiber | ③② Frequenzteiler zur Ableitung der 500-Hz-Impulse und der Steuerfrequenzen für Koordinatenwandler und Quarzuhren |
| ②⑦ Linienschreiber | |
| ②⑧ Kontinuum-ZF-Verstärker | |

stärkungsänderung von 1‰ bereits als Meßfehler der Antennentemperatur von $3,2\text{° K}$ aus. Die äußeren physikalischen Größen, die die Verstärkung des Empfängers am meisten beeinflussen, sind Netzspannung und Raumtemperatur. Zwar werden sowohl Heizspannung als auch Anodenspannung elektronisch geregelt, doch können diese rückwärts regelnden Konstanthalter bzw. elektronischen Netzgeräte die Folgen sprunghafter Änderungen der Netzspannung nicht restlos beseitigen. Aus diesem Grund wurde zwischen Netzausgang und Energieversorgungsanschluß der HF-Anlage ein provisorisches Motor-Generator-Aggregat geschaltet, das schon durch seine Schwungmasse alle schnellen Netzspannungsänderungen ausgleicht. Zur Kontrolle der Regelgenauigkeit aller Speisegeräte wurde die Netzspannung willkürlich um 10 V geändert; eine schnelle Verstärkungsänderung war dabei nicht zu beobachten, sondern nur eine allmählich einsetzende Drift der Nulllinie des Verstärkers, die sich vermutlich aus der Änderung seiner Innentemperatur erklärt. Der Temperaturkoeffizient der HF-Anlage bezüglich der Raumtemperatur ist negativ und von der Größenordnung

$$\Delta T_{\text{Rausch}} / \Delta T_{\text{Raum}} \sim -4,$$

und zwar gilt dieser Koeffizient sowohl für Änderungen der Temperatur in der Meßkabine (Eingangsteil), als auch für den Empfängerraum (Haupt-ZF-Verstärker). Für sehr genaue Messungen ist daher eine Regelung der Raumtemperatur auf $\pm 0,5\text{° C}$ unerlässlich.

Bei einer Änderung der Oszillatoramplitude bzw. des Detektorstromes von 1% ändert sich die mittlere Spannung u_e am Gleichrichter so, daß ein Signal von 2 bis 3° K vorgetäuscht wird. Deshalb mußte nachträglich eine Gleichstromregelung, die auf konstanten Mittelwert des Detektorstroms regelt, in die Anlage eingebaut werden. Dagegen ändert sich die Rauschzahl des Empfängers mit dem Detektorstrom nur sehr wenig. Die zeitliche Konstanz der Empfängerempfindlichkeit ist bemerkenswert gut; tägliche Eichkontrollen ergaben über mehrere Monate eine Empfindlichkeitskonstanz besser als $\pm 2\%$. Sämtliche Verstärkerröhren in den ZF-Stufen sind gleichstrommäßig über $7\text{-k}\Omega$ -Widerstände gegengekoppelt, wodurch eine sehr hohe Verstärkerstabilität erreicht wird⁴⁾; eine selbsttätige Spannungsregelung des Linienempfängers, die als weitere Nichtlinearität in die Empfängereichkurve einginge, erübrigt sich damit.

⁴⁾ Diese gleichstrommäßige Gegenkopplung der ZF-Verstärkerröhren wurde unseres Wissens erstmalig von Ch. L. Seeger zur Stabilisierung radioastronomischer Empfänger angewandt.

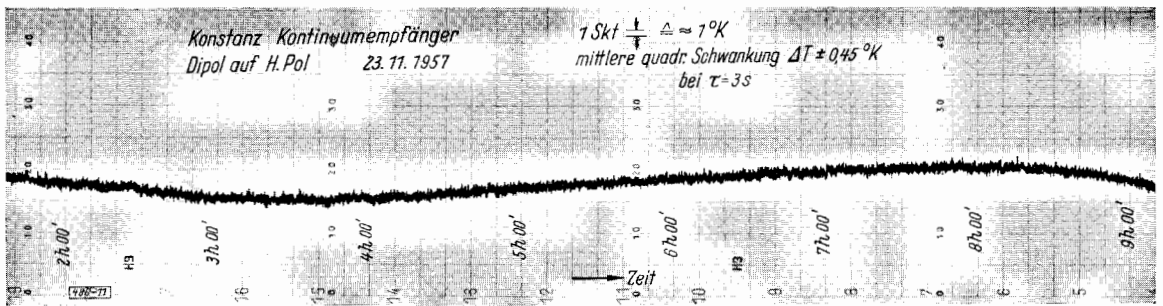


Bild 10: Registrierung mit Kontinuumempfänger über 7 Stunden zur Feststellung der Verstärkerkonstanz. Antenne auf Himmelspol gerichtet. Drift der Rauschtemperatur etwa $1^\circ \text{K}/\text{Stunde}$

Beim Direktmeßverfahren mit Unterdrückung des Spiegelwellenempfangs ist die mittlere quadratische Schwankung eines Meßwertes⁵⁾

$$\Delta T = \pm \frac{1}{2} \frac{T_e}{\sqrt{\tau B}} = \pm 0,84 \cdot \tau^{-1/2} [^\circ\text{K}]; \quad (2)$$

τ = Zeitkonstante des Tiefpasses; $B = 0,9 \text{ MHz} = \text{HF-Bandbreite}$; $T_e = 1600^\circ \text{K} = \text{Eigenrauschtemperatur}$. Diese Gleichung berücksichtigt nur die statistische Verteilung der Rauschspitzen und setzt im übrigen ideale Empfängereigenschaften voraus. Eine experimentelle Überprüfung der Gl. (2) wird im nächsten Abschnitt gegeben. Bild 10 zeigt eine typische Registrierung der zeitlichen Verstärkerkonstanz. Die Antenne wurde bei dieser Messung auf den Himmelspol gerichtet. Die maximale Änderung der Nulllinie des Empfängers beträgt 5°K ; die aus Gl. (2) berechnete theoretische Schwankungsbreite ist 1°K (bei $\tau = 3 \text{ s}$); als Nulllinien-drift ergibt sich etwa $1^\circ \text{K}/\text{Stunde}$. Eine wirkliche Grenze der Meßgenauigkeit wird jedoch nicht durch Gl. (2), sondern durch das Empfängereigenrauschen gegeben. Diese untere Grenze für das Temperaturauflösungsvermögen liegt heute bei den besten Empfängern etwa beim 10^{-4} -fachen Betrag ihrer Eigenrauschtemperatur.

Eine wirkliche Verbesserung des Energieauflösungsvermögens von Radioteleskopen wird wohl erst durch die Anwendung neuer Verstärkungsprinzipien — wie Wanderfeldröhren und Molekularverstärker — zu erreichen sein. Eine durch die Atmosphäre bedingte Grenze des Energieauflösungsvermögens eines Radioteleskops — ähnlich wie das Nachhimmelleuchten das Leistungsvermögen optischer Teleskope begrenzt — ist möglicherweise die thermische Radiostrahlung der Atmosphäre, über deren zeitliche Änderung jedoch noch keine Beobachtungen vorliegen. Aufschlußreich ist in diesem Zusammenhang die Kontinuumregistrierung (Bild 11), die während eines abziehenden Gewitters mit in den Zenit gerichteter Antenne gemacht wurde; sie zeigt, daß der 1420-MHz-Anteil des Leistungsspektrums einer Blitzentladung noch beträchtlich ist.

b) Zeitliche Konstanz beim Differenzmeßverfahren

Wie man leicht einsieht, gehen Verstärkungsänderungen, die langsamer als die Umtastfrequenz verlaufen, nur relativ in das Meßergebnis ein. Aus diesem Grund kommt man den Eigenschaften eines idealen Emp-

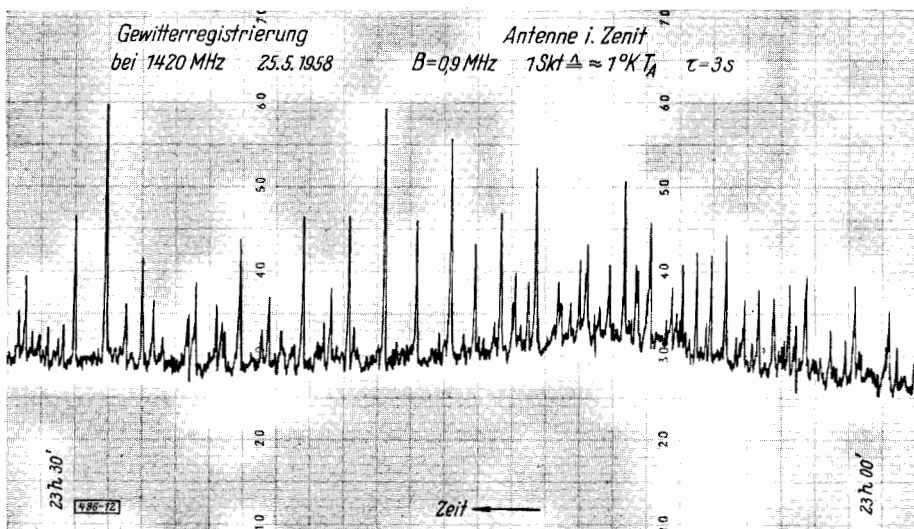


Bild 11: Registrierung eines abziehenden Gewitters mit dem 21-cm-Empfänger. Antenne auf den Zenit gerichtet; Zeitkonstante des Tiefpasses 3 s

⁵⁾ Dieses Ergebnis wird hier ohne Ableitung mitgeteilt.

fängers bei experimentellen Untersuchungen des theoretischen Temperaturauflösungsvermögens eines Linienempfängers ziemlich nahe. Die mittlere quadratische Schwankung bei dem verwendeten Differenzmeßverfahren mit Integration des Meßwertes ergibt sich nach [4] zu

$$\Delta T = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_e}{\sqrt{B t_m}} = 1,9 (t_m [\text{min}])^{-1/2} [^\circ\text{K}], \quad T_e = 1600^\circ; B = 30 \text{ kHz}; t_m = \text{Integrationszeit.} \quad (3)$$

Wird also derselbe Wert einer Strahlungstemperatur sehr oft gemessen, dann sollten nach Gl. (3) 66% aller Meßwerte innerhalb des Bereichs ΔT liegen. Auf diese Weise wurde Gl. (3) in rund 2000 Einzelmessungen experimentell geprüft. Die Streuung der Meßwerte läßt sich durch eine Gaußverteilung darstellen. An Stelle eines berechneten Streuparameters $\Delta T = \pm 1,4^\circ \text{K}$ ergaben die Versuche den Wert $\Delta T = \pm 1,8^\circ \text{K}$. In der experimentell beobachteten, etwas größeren Streuung der Meßwerte drücken sich die wirklichen Empfängereigenschaften aus, wie Verstärkungsschwankungen, Rauschzahländerungen usw. [s. **] auf Seite 32].

Das zu analysierende Linienprofil (Bild 2) überlagert sich dem Eigenrauschen des Empfängers. Eine Differenz des Empfängerrauschens im Vergleichs- und Meßkanal geht in voller Größe als vorgetäuschte Linienstrahlung in eine Profilmessung ein. Wegen der eingangs erwähnten Eigenschaft des Differenzmeßverfahrens, langsame Verstärkungsschwankungen automatisch zu eliminieren, wird die erreichbare Meßgenauigkeit bei Linienmessungen nicht wie beim Direktmeßverfahren durch die zeitliche Verstärkungskonstanz begrenzt, sondern durch die Konstanz des Empfängerrauschens über der Frequenz. Unter der Nulllinie eines Linienempfängers versteht man daher im allgemeinen die von dem Empfänger registrierte scheinbare Änderung der Antennentemperatur über seinem Analysierbereich, wenn die Antenne selbst keine Linienstrahlung empfängt. Die Forderung einer Nulllinienkonstanz von 1°K schließt also implizite die Forderung einer Konstanz des Empfängerrauschens besser als $10/100$ innerhalb des Analysierbereichs in sich. Notwendige technische Voraussetzung dafür ist ein — vom Mischkopf in Richtung auf die Antenne gesehener — reflexionsfreier Abschluß sowohl der Empfangsfrequenz, als auch der Spiegelfrequenz. Durch die Verwendung von Brückenfilter und Ferrit-Isolator wird diese Impedanzforderung eingehalten, wobei gleichzeitig die genügende Vorselektion zur Vermeidung von störendem Empfang auf der Spiegelfrequenz erreicht wird. Näheres darüber in [9].

Der Feinabgleich der dem Filter folgenden Mischstufe mit dem Empfänger selbst ist nur dann einwandfrei, wenn sowohl die Antenne als auch ein Absorber auf den Empfänger geschaltet werden können, ohne daß sich die Nulllinie ändert. Zur Zeit ist eine Nulllinienkonstanz besser als 1°K im Bereich $1420 \pm 2,3 \text{ MHz}$ zu erreichen. Bild 12 zeigt eine typische Nulllinienregistrierung im Bereich $1420,262$ bis $1421,257 \text{ MHz}$. Die theoretische Schwankung der Meßwerte der Rauschdiode nach Gl. (3) beträgt $\pm 1,4^\circ \text{K}$; 1 Skt des Registrierpapiers entspricht einer Antennentemperatur von 1°K .

3. Die Antenne und ihre Absoluteichung

Der Durchmesser der Antenne beträgt 25 m, der Abstand des Dipols vom Scheitel des Paraboloids 7,5 m. Über die mechanische Genauigkeit von Spiegel und Standrohr und deren Einfluß auf die elektrische Achse des Radioteleskops wird an anderer Stelle in diesem Heft berichtet [2]. Hier sollen daher lediglich die Empfangseigenschaften der Antenne, die unmittelbar in die Absoluteichung der Antenne eingehen, behandelt werden. Einzelheiten über die Messungen der Antenneneigenschaften finden sich in [6], [9], [11].

Die Antennencharakteristik $f(\varphi, \theta)$ von Radioteleskopen wird am zweckmäßigsten mit den Radioquellen selbst ausgemessen. So wurde die Hauptkeule des Bonner 25-m-Teleskops mit der Radioquelle Cas A bestimmt,

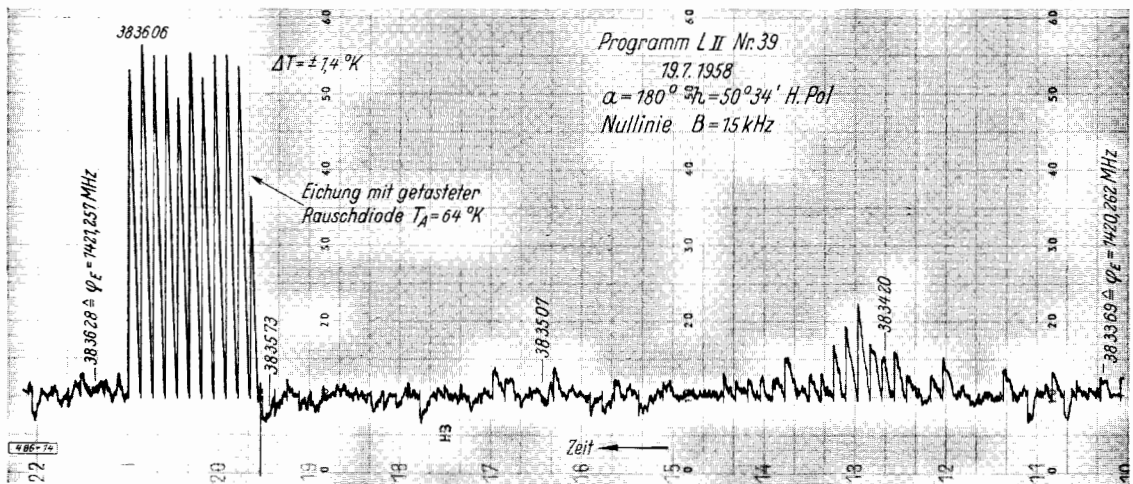


Bild 12: Nulllinienregistrierung und Eichung des Linienempfängers. $B_u = 15 \text{ kHz}$, $t_m = 4 \text{ min}$, $D = 11,5 \text{ kHz}$

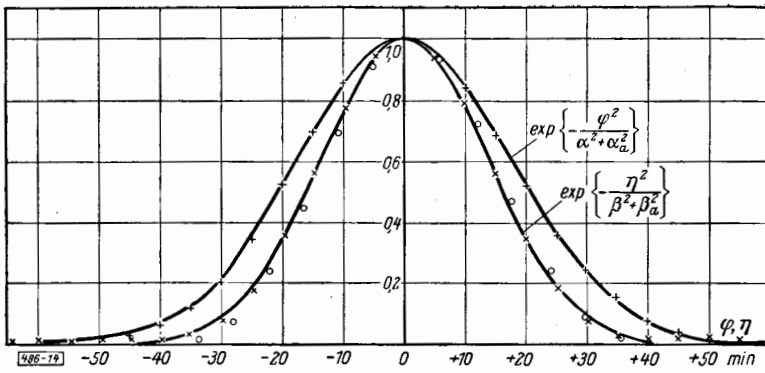


Bild 13: Durchlaufregistrierung der Radioquelle Cas A (Kreuze) und Cyg A (Kreise) durch die Hauptebenen der Bonner 25-m-Antenne bei 1420 MHz. Die eingezeichneten Gaußkurven sind so berechnet, daß die Meßpunkte in der elektrischen (ξ) bzw. magnetischen (η) Ebene möglichst gut approximiert werden.

Berichtigung: Lies die Ordinatenbezeichnung statt φ, η richtig ξ, η .

kurven durch die Hauptebene der Bonner 25-m-Antenne zeigt Bild 13 (Meßpunkte). Die Nebenzipfel der Antennencharakteristik sowie die Rückwärtsdämpfung der Antenne können bis zu Dämpfungswerten von 50 dB mit der Sonne gemessen werden. Die Ausmessung der Charakteristik hatte folgende Ergebnisse:

a) Ausmessung der Hauptkeule

Die Hauptkeule der Antenne wird mit sehr guter Genauigkeit durch die zweidimensionale Gaußverteilung

$$f_H = \exp \left\{ -\frac{\xi^2}{\alpha^2} - \frac{\eta^2}{\beta^2} \right\} \quad (4)$$

dargestellt. Die Parameter α, β mit den numerischen Werten $\alpha = 24,6'$ und $\beta = 19,5'$ wurden so gewählt, daß die Meßwerte (Bild 13) durch die nach Gl. (4) berechneten, in Bild 13 ausgezogenen Kurven möglichst gut angenähert werden⁶⁾. Für kleine Winkelbereiche können dabei die Winkelvariablen φ, θ durch die kartesischen Koordinaten ξ, η ersetzt werden. Als Halbwertsbreiten ergaben sich in der elektrischen Ebene $\xi_E = 20,5'$; in der magnetischen Ebene $\eta_H = 16,25'$.

b) Ausmessung der Nebenzipfel

Nebenzipfel mit einer Dämpfung < 50 dB finden sich nur in einem Winkelbereich $\pm 15^\circ$ um die Hauptkeule. Die Dämpfung der Nebenzipfel $D_{\dot{a}}$ an den Spiegelkanten sowie die Rückwärtsdämpfung des Spiegels ist auf jeden Fall > 50 dB. Für die ersten Minima bzw. Maxima ergaben sich die Werte der Tabelle 1.

c) Die Absoluteichung der Antenne

Der Zusammenhang zwischen der Antennentemperatur T_A , die eine punktförmige Radioquelle im Empfangereingang eines Radioteleskops erzeugt und ihrem Strahlungsfluß S_v am Beobachtungsort ist durch die

Tab. 1		1. Maximum	1. Minimum	Hauptwert	1. Minimum	1. Maximum	
magn. Ebene	η	Cas A	-45'	—	0,0'	40'	50'
		Sonne	-56'	—	0,0'	—	56'
	$D_{\dot{a}}$	Cas A	27,4 dB	—	0	—	26,7 dB
		Sonne	22,2 dB	—	0	—	20,8 dB
elektr.	ξ	Sonne	-1° 58'	-1° 39'	0,0'	+1° 71'	+1° 40'
		$D_{\dot{a}}$ Sonne	35,8 dB	—	0	—	31,1 dB

Beziehung

$$S_v = 2 k T_A / A_0, \quad k = \text{Boltzmannkonstante}, \quad A_0 = \text{Absorptionsfläche der Antenne}, \quad (5)$$

gegeben. Zwischen Absorptionsfläche A_0 und Gewinn G_0 einer Antenne besteht allgemein gültig der Zusammenhang

$$A_0 = G_0 \lambda^2 / 4 \pi \quad (6)$$

⁶⁾ Der endliche Öffnungswinkel der Radioquelle Cas A von $3,8'$ wurde dabei berücksichtigt.

Die exakte Bestimmung der Absorptionsfläche bzw. des Gesamtgewinns einer Antenne ist eines der fundamentalsten Probleme der Radioastronomie. Zu dessen näherungsweise Lösung idealisiert man die wirkliche Antennencharakteristik durch ihre Hauptkeule und durch einen homogen über die restliche Kugelfläche verteilten Streubereich, der durch den Streufaktor β_s charakterisiert wird. Die physikalische Interpretation dieses Streufaktors ist einfach: in einem isotropen Strahlungsfeld würde von der insgesamt von der Antenne aufgenommenen Strahlung der Beitrag $(1 - \beta_s)$ aus dem Hauptkeulenbereich, der Beitrag β_s aus dem Streubereich stammen. Kennt man den numerischen Wert des Streufaktors, dann können Gewinn und Absorptionsfläche, die sich zunächst mit Gl. (4) nur für die Antennenhauptkeule ergeben, auch für die Gesamtantenne ermittelt werden [11].

Aus Gl. (4) errechnet sich ein Hauptkeulenraumwinkel $\Omega_H = \pi \alpha \beta = 0,419^\circ$, und damit ein Hauptkeulengewinn $G_H = 4 \pi / \Omega_H = 9,85 \cdot 10^4$. Als Streufaktor der Bonner 25-m-Antenne bei 1420 MHz wurde von uns auf zwei unabhängige Methoden ein Wert von $\beta_s = 0,25 \pm 8\%$ ermittelt. Damit ergibt sich nach [11] ein Gesamtgewinn, $G_0 = (1 - \beta_s) \cdot G_H = 7,38 \cdot 10^4 \pm 4\%$, eine Absorptionsfläche $A_0 = G_0 \lambda^2 / 4 \pi = 262,0 \pm 11 \text{ m}^2$ und damit ein Flächenwirkungsgrad von 53,5% für die Bonner 25-m-Antenne. Setzt man die numerischen Werte in (5) ein, dann erhält man $S_{1420} = 1,053 \cdot 10^{-25} \cdot T_A \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$.

Mit einer eben noch meßbaren Antennentemperatur von $\sim 0,3^\circ \text{ K}$ (A 2) wird der kleinste, mit dem 25-m-Teleskop bei 1420 MHz eben noch beobachtbare Strahlungsfluß $S_{\min} \sim 3 \cdot 10^{-26} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$. Der Strahlungsfluß der stärksten Radioquelle außer der Sonne, Cas A, beträgt demgegenüber $2668 \cdot 10^{-26} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$. Radioastronomische Beobachtungen bei 1420 MHz mit dem 25-m-Teleskop umfassen also nur einen Intensitätsbereich von rund $1 : 10^3$, gegenüber einem Intensitätsbereich von $1 : 10^{10}$, der heute im Bereich optischer Wellenlängen beobachtet werden kann. Diese Tatsache macht das Interesse der Radioastronomie an einer Verbesserung des Temperaturauflösungsvermögens bzw. Herabsetzung der Rauschtemperatur der Empfänger verständlich.

Bei der Beobachtung der galaktischen Linienstrahlung handelt es sich nicht um punktförmige Radioquellen; vielmehr sind die Wolken des interstellaren Wasserstoffs so ausgedehnt, daß ihr Öffnungswinkel im allgemeinen größer als der Öffnungswinkel der Antenne ist. In diesem Falle ist nicht mehr der Strahlungsfluß, sondern die Flächenhelligkeit bzw. die Strahlungstemperatur T_S der Wolke ein geeignetes Maß für die beobachtete Strahlungsintensität. Der Zusammenhang zwischen Strahlungstemperatur T_S und Antennentemperatur T_A ist dann einfach durch die Beziehung

$$T_S = T_A / (1 - \beta_s) = 1,33_3 \cdot T_A \quad (7)$$

gegeben, wobei der numerische Wert wieder für das Bonner 25-m-Teleskop bei 1420 MHz gilt.

Die verhältnismäßig kurze Entwicklungszeit der Anlage, die mit dem Radioteleskop erreichbaren hohen Meßgenauigkeiten und die sich daraus ergebenden aufschlußreichen radioastronomischen Meßergebnisse sind nicht zuletzt der außerordentlich guten Zusammenarbeit von Universitäts-Sternwarte und Telefunken zu danken. Unser ganz besonderer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. K. W. Grimm und Dipl.-Ing. E. Willwacher von Telefunken, deren persönliche Mitarbeit und Initiative es ermöglichte, teilweise ganz neue Lösungen der technischen Probleme zu finden, die sich bei der Beobachtung der Linienstrahlung des interstellaren Wasserstoffs ergeben. An der Entwicklung und Fertigstellung der HF-Empfangsanlage des Bonner Radioteleskops zwischen September 1956 und Januar 1958 waren außerdem die Herren Breitkopf, Geschwinde, Lange und Schnakenburg beteiligt.

B. Astronomische Messungen

Ein Teil der ersten astronomischen Meßprogramme wurde speziell so gewählt, daß ein direkter Vergleich unserer Meßresultate mit den Ergebnissen anderer Radioteleskope möglich ist. Im Abschnitt 1 berichten wir über Messungen der kontinuierlichen Radiostrahlung, im Abschnitt 2 über Beobachtungen der 21-cm-Linie des interstellaren Wasserstoffs.

1. Messungen der kontinuierlichen Radiostrahlung

Die Messungen, über die im folgenden kurz berichtet wird, wurden mit dem Kontinuumpempfänger der HF-Anlage ausgeführt. Die Bandbreite dieses Empfängers ist 0,9 MHz; als Bandmittenfrequenz wurde in den meisten Fällen 1418,5 MHz gewählt, um sicher zu gehen, daß der ganze Empfangsbereich außerhalb des

Bereichs der galaktischen Linienstrahlung liegt. Über die Technik der Kontinuumsmessungen wurde bereits in Heft 122, Abschnitt A 1, berichtet. Als primäres Ergebnis radioastronomischer Messungen erhält man zunächst Antennentemperaturen, aus denen man unter Berücksichtigung der Antenneneigenschaften (A 2) den Strahlungsfluß bzw. die Flächenhelligkeit berechnen kann. Diese Größen sind von den Instrumenteneigenschaften befreit. Doch begnügt man sich in vielen Fällen — z. B. bei vielen Durchmusterungen — mit der Angabe der Antennentemperatur als relativer Größe.

a) Einfluß von Atmosphäre und Erdboden auf radioastronomische Messungen

Genau wie das sichtbare Licht werden auch Radiowellen in der Atmosphäre gedämpft und abgelenkt. Diese Effekte — in der Astronomie Extinktion und Refraktion genannt — hängen natürlich vom Elevationswinkel ab. Bild 14 a zeigt den theoretischen Verlauf der Dämpfung [12]. Eine experimentelle Überprüfung dieser Kurve (man kann sowohl Punktquellen als auch die Linienstrahlung einer Wasserstoffwolke zu diesen Messungen verwenden) ist für sehr niedrige Elevationen schwierig. Vermutlich sind es Interferenzeffekte, die z. B. durch Aufgliederung (Bild 15 a) einer normalen Durchlaufkurve (Bild 15 b...d) Messungen bei niedrigen Elevationswinkeln stark verfälschen können. Eine weitere Möglichkeit, die Extinktion zu bestimmen, führt über die Messung der thermischen Radiostrahlung der Atmosphäre. Denn in dem Maße, in dem die Atmosphäre Radiowellen dämpft, emittiert sie auch selbst

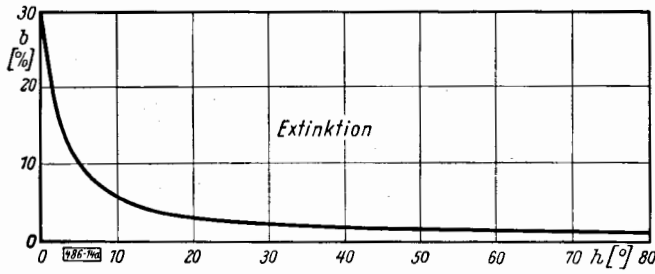


Bild 14 a: Extinktion der Atmosphäre für $1,5 \text{ m} \geq \lambda \geq 3 \text{ cm}$ nach [12]

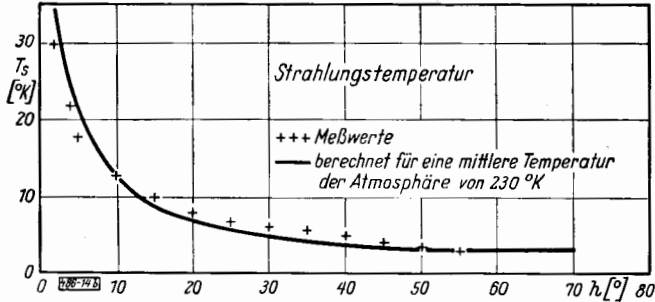


Bild 14 b: Berechnete und beobachtete Strahlungstemperatur der Atmosphäre bei 1420 MHz

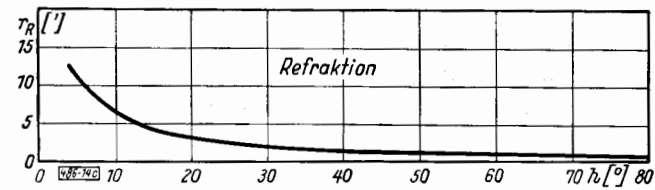


Bild 14 c: Refraktion r_R für $1,5 \text{ m} \geq \lambda \geq 3 \text{ cm}$ nach [12]

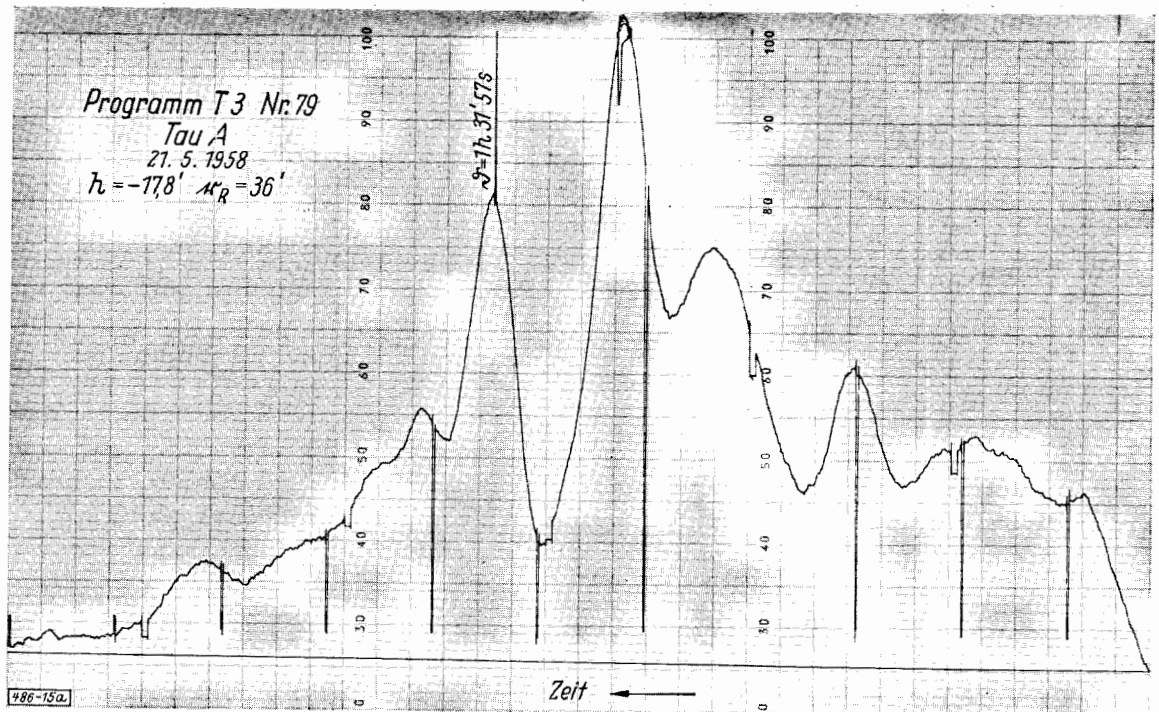


Bild 15 a: Aufgefiederte Durchlaufkurve der Radioquelle Tau A bei sehr niedriger Elevation. $\nu = 1419 \text{ MHz}$, maximale Antennentemperatur $91,9^\circ \text{ K}$

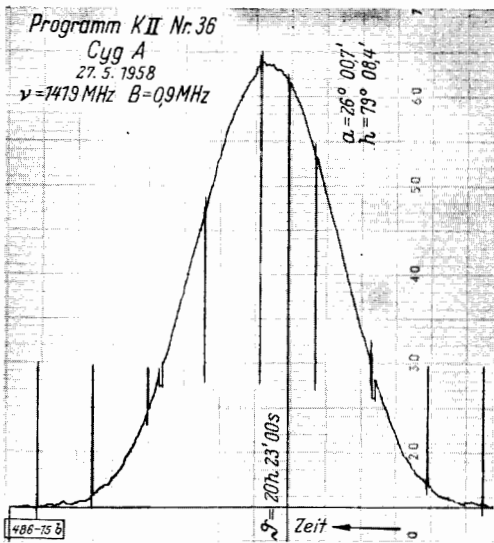


Bild 15 b (links):
Durchlaufkurve der Radioquelle Cyg A.
 $\nu = 1419 \text{ MHz}$,
maximale Antennentemperatur $155,1^\circ \text{ K}$

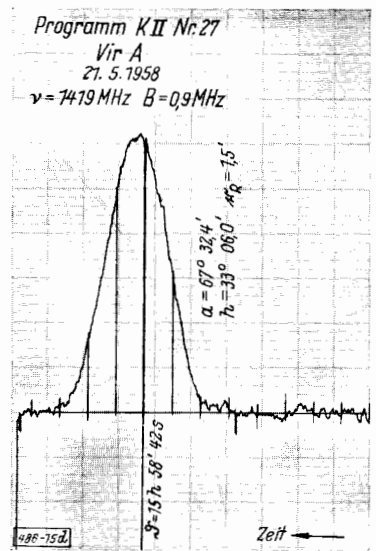


Bild 15 d (rechts):
Durchlaufkurve der Radioquelle Vir A.
 $\nu = 1419 \text{ MHz}$,
maximale Antennentemperatur $20,6^\circ \text{ K}$

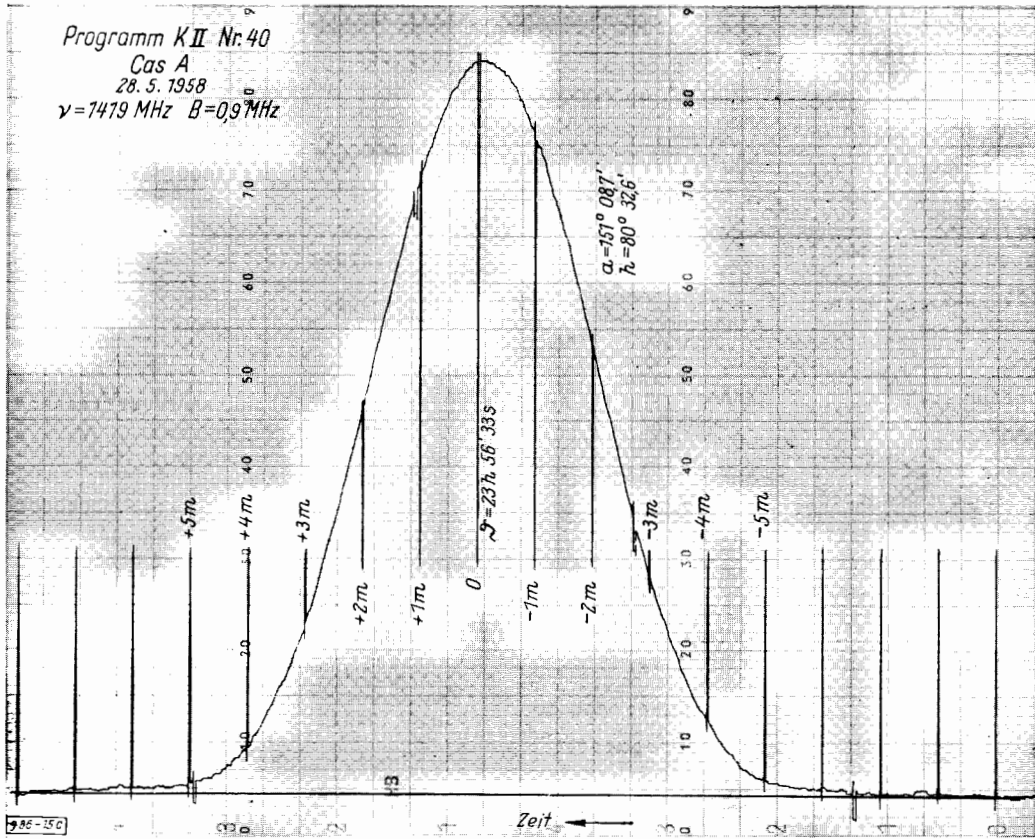
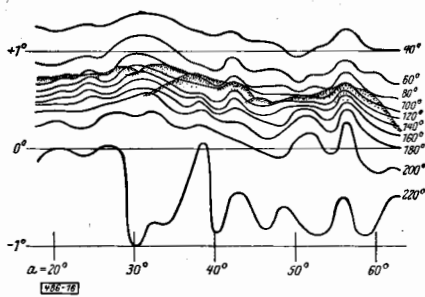


Bild 15 c: Durchlaufkurve der Radioquelle Cas A. $\nu = 1419 \text{ MHz}$, maximale Antennentemperatur 253° K

Radiowellen; die Strahlungstemperatur der Atmosphäre ergibt sich theoretisch zu $b \cdot T_L$, wobei der Dämpfungskoeffizient b der Kurve Bild 14a entnommen werden kann, während für die Temperatur der Atmosphäre T_L ein geeigneter Mittelwert einzusetzen ist. Den Verlauf der tatsächlichen Strahlungstemperatur zeigen die Meßpunkte in Bild 14b, während die ausgezogene Kurve den theoretischen Verlauf für eine mittlere Lufttemperatur von 230° K darstellt. Bei niederen Elevationen scheint die Annahme einer mittleren Lufttemperatur die wirklichen Verhältnisse zu sehr zu idealisieren. Die Refraktion bewirkt ein scheinbares Anheben der Position eines Sternes bzw. einer Radioquelle. Bild 14c zeigt den theoretischen Verlauf der Refraktion; vorläufige Messungen ergeben ein sehr gutes Übereinstimmen mit den theoretischen Werten zumindest bei Elevationen $> 10^\circ$ [2]. In einem Winkelbereich von etwa 2° über dem Horizont wird der Einfluß der thermischen Radiostrahlung des Erdbodens stark bemerkbar. Unser Radioteleskop kann auf Elevationen von minimal $-1,5^\circ$ eingestellt werden. Daher lag es nahe, diese thermische Bodenstrahlung bei konstanter Elevation in Abhängigkeit vom Azimutwinkel zu untersuchen. Bild 16 zeigt einen Ausschnitt eines Radiobildes des Horizonts, das dadurch entsteht, daß die Linien konstanter Antennentemperatur in ein bezüglich der



Querschnitt der Antennen-Hauptkeule unter Berücksichtigung des im obigen Diagramm angewandten Maßstabes.

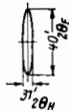


Bild 16

Thermische Radiostrahlung des Erdbodens bei 1420 MHz. In die schwarz schraffierten Konturen des optischen Horizontes ist das „Radiobild“, d. h. die Linien konstanter Antennentemperatur, eingezeichnet. Die Elevationskoordinate ist stark gedehnt. Die schraffierte Fläche ist die maßstäblich eingezeichnete Halbwertseleipse der Antennen-hauptkeule

Elevationskoordinate stark gedehntes Bild des optischen Horizontes eingezeichnet werden. Die Übereinstimmung von optischem und Radiobild ist dabei überraschend gut [13].

b) Die Spektren von Radioquellen

Den Absolutmessungen von Strahlungsintensitäten, die in den ersten Jahren der Radioastronomie aus instrumentellen Gründen vernachlässigt wurden, kommt heute bei der Klärung der Frage nach der physikalischen Natur der kosmischen Radioquellen große Bedeutung zu. Man unterteilt die Radioquellen nach ihren Spektren in die zwei großen Gruppen der thermischen und der nichtthermischen Quellen. Bild 17 zeigt das für nichtthermische Quellen typische Spektrum der Radioquelle Cas A, deren Strahlungsfluß mit der Frequenz nach einem Potenzgesetz abnimmt. Dagegen steigt der Strahlungsfluß einer thermischen Radioquelle (Bild 18) mit wachsender Frequenz zunächst an; zugleich nimmt jedoch die optische Dicke einer gegebenen Schicht ionisierten Wasserstoffs mit der Frequenz ab, so daß bei einer bestimmten Wellenlänge die zunächst optische dicke Schicht für Radiowellen transparent zu werden beginnt. Dieser Effekt kompensiert dann gerade die Zunahme des Strahlungsflusses so, daß die Gesamtstrahlung konstant bleibt.

Die Spektren der Radioquellen enthalten noch andere astrophysikalische Informationen. Wir wollen hier aber nur auf ein Anwendungsbeispiel hinweisen, das besonders für die Vermessung großer Antennen von Bedeutung ist. Nach der Beziehung (5) zwischen gemessener Antennentemperatur T_A und Strahlungsfluß S_ν , kann bei genauer Kenntnis des Strahlungsflusses einer Radioquelle aus der gemessenen Antennentemperatur die Absorptionsfläche A_0 bzw. der Gewinn der Antenne mit relativ geringem Aufwand auf einige Prozent genau berechnet werden. Die Messungen des absoluten Strahlungsflusses der fünf stärksten Radioquellen am Nordhimmel waren zusammen mit der Absoluteichung der Antenne eine der ersten Messungen, die mit dem Bonner 25-m-Teleskop bei 1419 MHz ausgeführt wurden [6]. Zum Vergleich mit unseren Meßwerten für Cas A führen wir in Tab. 2 noch die von Hagen [16] bei 1420 MHz und Westerhout [15] bei 1390 MHz gemessenen Werte an.

Tabelle 2: Strahlungsfluß S von Cas A

S	Bonn, 1419 MHz	Hagen, 1420 MHz	Westerhout, 1390 MHz
W/m ² Hz	$2668 \cdot 10^{-26} \pm 310$	$2660 \cdot 10^{-26}$	$3100 \cdot 10^{-26} \pm 600$

Der von uns gefundene Meßwert liegt sehr nahe an der z. Z. wahrscheinlichsten Kurve (Bild 19) für das Spektrum von Cas A.

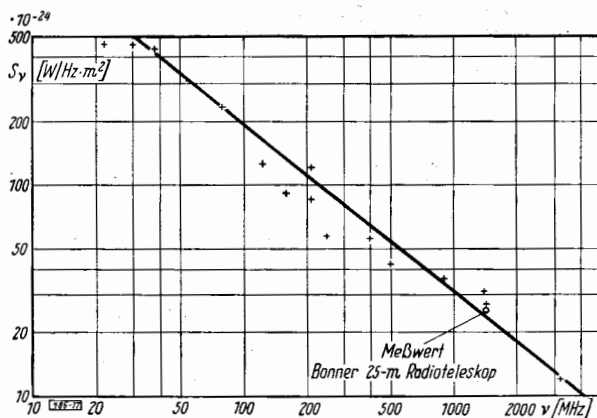


Bild 17: Spektrum der nichtthermischen Radioquelle Cas A Zusammenstellung der Meßwerte (+ + +) nach [24]

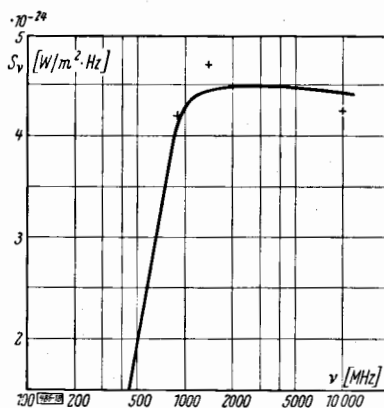


Bild 18: Spektrum einer therm. Radioquelle (Orionnebel) Zusammenstellung der Meßwerte [14]

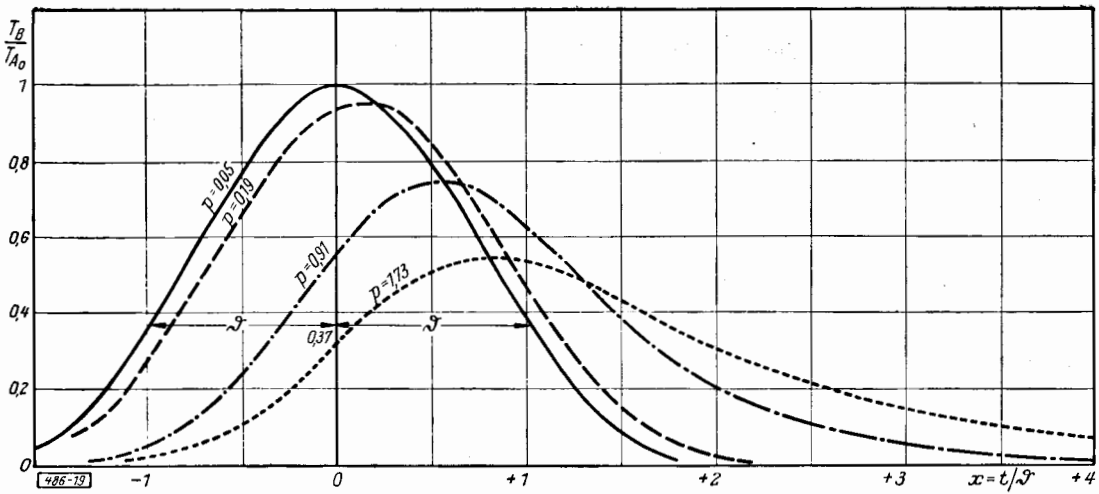


Bild 19: Durchlaufkurven der Radioquelle Cas A registriert mit verschiedenen Zeitkonstanten des Tiefpasses. Parameter p ist das Verhältnis von Zeitkonstante τ zur „halben Durchlaufzeit“ θ der Radioquelle, nach [5]

c) Durchmusterungen

Am Beginn der meisten Kontinuumsmeßreihen stehen sogenannte Durchmusterungen. Die Himmelskugel wird mit der Antenne abgetastet, und die Linien konstanter Antennentemperatur werden in ein geeignetes Koordinatennetz eingezeichnet. Eine sehr sorgfältige Durchmusterung bei 1390 MHz wurde von G. Westerkhout [15] mit dem holländischen 25-m-Radioteleskop ausgeführt. Ein grundsätzliches Problem solcher Durchmusterungen ist die Wahl der Abtastbahn und der Abtastgeschwindigkeit der Antenne. Denn der Informationsinhalt einer solchen Messung wird begrenzt durch das Winkelauflösungsvermögen der Antenne einerseits, und durch das Energieauflösungsvermögen des Empfängers andererseits. Nun ist das Winkelauflösungsvermögen einer Antenne eine Instrumentenkonstante, und zwar läßt sich zeigen [5], daß es prinzipiell — auch durch Entfaltung — nicht möglich ist, Winkelstrukturen an der Sphäre aufzulösen, die viel kleiner als der Öffnungswinkel der Antenne sind. Dagegen ist das theoretische Energie(Temperatur)auflösungsvermögen eines Empfängers durch sein Eigenrauschen T_e , seine Bandbreite B und die Zeitkonstante τ des Tiefpasses am Gleichrichter bestimmt (Gl. 2 im 1. Teil). Es ist nun wichtig, Abtastgeschwindigkeit einer Antenne und Zeitkonstante des Tiefpasses so aufeinander abzustimmen, daß der Informationsinhalt einer Durchmusterung, der mit dieser Antenne erhalten werden kann, nicht durch den Tiefpaß beschnitten wird.

Die Wirkung verschiedener Zeitkonstanten bei konstanter Abtastgeschwindigkeit (bzw. verschiedener Abtastgeschwindigkeiten bei konstanter Zeitkonstante) zeigt Bild 19 am Beispiel einiger Durchlaufkurven der Radioquelle Cas A. Der Parameter $p = \tau/\theta$ gibt das Verhältnis von Zeitkonstante τ des Tiefpasses zur „halben Durchlaufzeit“ θ der Radioquelle. Die Wirkungen von Antennencharakteristik und Tiefpaß auf radioastronomische Messungen wurden von uns eingehend untersucht [5] und eine Regel

$$v \leq 0,06 \theta/\tau \quad (10)$$

aufgestellt, die es erlaubt, bei gegebener Zeitkonstante des Tiefpasses und Öffnungswinkel θ der Antenne die Abtastgeschwindigkeit v der Antenne so zu wählen, daß die Dämpfung des Maximums einer Durchlaufkurve $< 1\%$ und die Verschiebung ihrer Mittellinie τv ist.

d) Die thermische Radiostrahlung des Mondes

Im sichtbaren Licht kann man am Mond nur die Reflexion des Sonnenlichtes beobachten, im Radiobereich dagegen strahlt der Mond entsprechend seiner Oberflächentemperatur als mehr oder minder idealer schwarzer Körper. Der Anteil der reflektierten Radiostrahlung der Sonne ist dabei zu vernachlässigen. Beobachtungen der thermischen Radiostrahlung des Mondes geben daher unmittelbar Aufschluß über seine Oberflächentemperatur, und mittelbaren Aufschluß über die Beschaffenheit seiner Oberfläche.

Eine Hälfte des Mondes wird ständig durch Sonneneinstrahlung erwärmt; diese bestrahlte Fläche wandert im Laufe von 29,5 Tagen einmal um den Mond. Da keine Atmosphäre für einen thermischen Ausgleich sorgt, kühlt sich die Schattenseite des Mondes sehr rasch wieder ab; ein Teil seiner Oberflächenwärme wird dabei in den Raum abgestrahlt, der andere Teil dringt als stark gedämpfte Wärmewelle ins Mondinnere ein. Je länger nun die beobachtete Radiowellenlänge ist, aus desto tieferen Schichten der Mondoberfläche stammt der wesentliche Beitrag zu dieser thermischen Strahlung. Daher läßt sich die zuerst von Piddington und Minett

[17] bei 1,25 cm Wellenlänge beobachtete Phasenverschiebung der Radiostrahlung gegenüber dem zeitlichen Verlauf der thermischen Strahlung im Infrarotgebiet qualitativ leicht verstehen. Eine quantitative Übereinstimmung zwischen Theorie und Meßergebnis ist jedoch nur bei sehr speziellen Annahmen über die Beschaffenheit der Mondoberfläche zu erreichen.

Spätere Messungen bei 10 cm bestätigten zwar die Ergebnisse von *Piddington* und *Minett*, dagegen zeigten Messungen bei niedrigeren Frequenzen (400 und 900 MHz), daß in diesem Wellenlängenbereich offenbar keine wesentliche Änderung der Radiostrahlung des Mondes im Verlauf einer Lunation auftritt. Diese, einander teilweise widersprechenden Meßergebnisse lagen vor, als wir im Frühjahr 1958 mit der Messung der Radiostrahlung des Mondes bei 1419 MHz begannen und diese Messungen täglich während etwas über drei Monate fortsetzten [18]. Die gemessenen Antennentemperaturen zeigten eine deutliche Abhängigkeit von der Mondphase. Doch ändert sich die Entfernung Mond – Erde im Laufe einer Lunation um etwa 13%. Berücksichtigt man diese Entfernungsvariation bei der Umrechnung der Antennentemperaturen in Strahlungstemperaturen des Mondes, dann ergibt sich ein auf 2% konstanter Wert von 250° K. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem theoretischen Wert von 245° K für die Temperatur der tieferen Schichten der Mondoberfläche, wie er sich aus Infrarotbeobachtungen von Mondfinsternissen ergibt [19], dann liegt die Vermutung nahe, daß zumindest die Radiostrahlung bei 21 cm und längeren Wellenlängen aus diesen tieferen Schichten stammt.

2. Messungen der Linienstrahlung des interstellaren Wasserstoffs

Um zunächst eine Basis für die Programmierung und Auswertung späterer Meßreihen zu bekommen, mußten die ersten Linienprogramme so gewählt werden, daß damit zugleich die Leistungsfähigkeit unserer Anlage kontrolliert werden konnte; darüber hinaus dienen diese ersten Meßreihen aber auch zur Vorbereitung späterer Programme. Wir geben im folgenden einen kurzen Überblick über die bisher ausgeführten Linienmessungen. Die Ausmessung eines Linienprofils mit einer Empfangsbandbreite von 30 kHz dauert durchschnittlich zwei Stunden, die Auswertung des Profils nimmt etwa die doppelte Zeit in Anspruch.

a) Durchmusterung eines speziellen Sektors der Milchstraße*)

Als wir im Januar 1958 mit Linienmessungen beginnen konnten, lagen bereits sehr vollständige Durchmusterungen der Milchstraße mit dem 7,5-m-Teleskop der Sternwarte Leiden vor**) [20]. Wir wählten daher

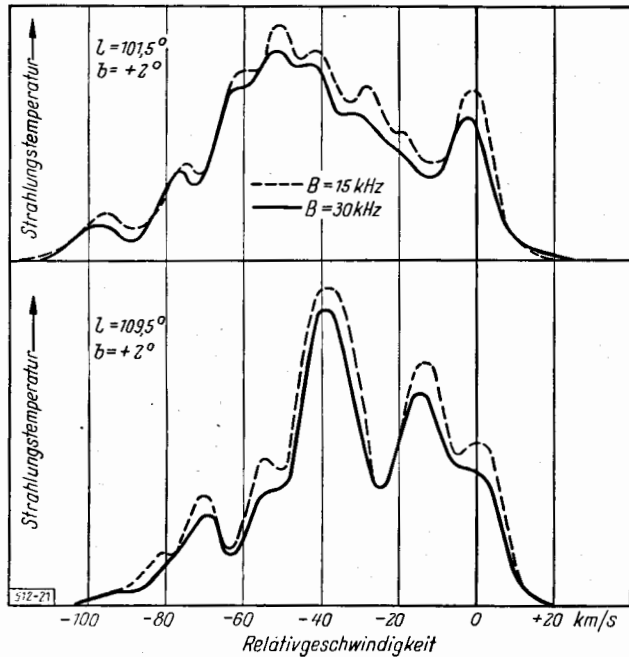
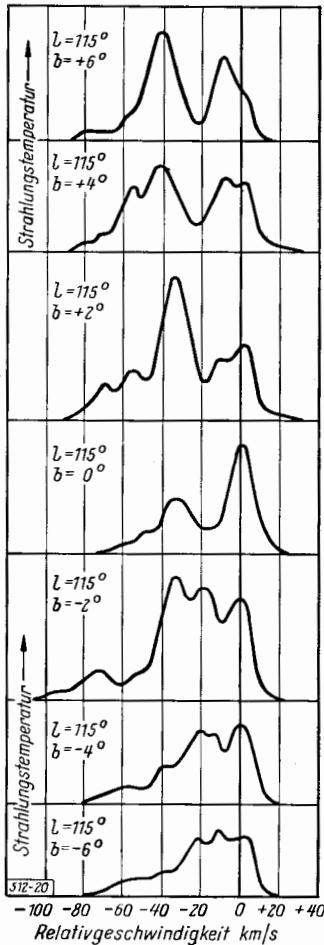


Bild 21: Zwei besonders strukturreiche Profile, mit zwei verschiedenen Bandbreiten registriert (ausgezogene Kurve: $B_u = 30$ kHz, $t_m = 2$ min, $D = 11,5$ kHz; gestrichelte Kurve: $B_u = 15$ kHz, $t_m = 4$ min, $D = 11,5$ kHz)

Bild 20 (links): Ausschnitt aus einer Beobachtungsreihe senkrecht zur galaktischen Ebene, die bei $l = 115^\circ$ zwischen $b = -20^\circ$ und $b = +20^\circ$ registriert wurde. $B_u = 30$ kHz, $t_m = 2$ min, $D = 11,5$ kHz

*) Programmierung und astronomische Leitung dieser Durchmusterung lag in den Händen der Herren Prof. Becker und Prof. Straßl.

**) Als Spiegel dieses Instrumentes diente eine während des 2. Weltkrieges von Telefunken für ein Radargerät (Würzburg-Riese) gebaute Antenne.

unser erstes Linienprogramm so, daß wir einen Sektor der Milchstraße von der galaktischen Länge $l = 100^\circ$ bis $l = 120^\circ$ durchmusteren, über den bereits Einzelmessungen mit dem 7,5-m-Teleskop vorlagen. So konnten wir die Leistungsfähigkeit unserer Anlage kontrollieren, und darüberhinaus feststellen, welche neuen astrophysikalischen Informationen von Liniendurchmusterungen mit hochauflösenden Antennen zu erwarten sind. Über die Ergebnisse dieser Messungen, die zur Zeit noch ausgewertet werden, soll in einer besonderen Arbeit berichtet werden. Bild 20 zeigt sieben Profile, die bei der konstanten galaktischen Länge $l = 115^\circ$ und verschiedenen galaktischen Breiten gemessen wurden.

b) Die Wahl einer geeigneten Empfängerbandbreite

Die HF-Bandbreite unseres Linienempfängers kann wahlweise auf 30,15 und 5 kHz umgeschaltet werden. Da die Meßgenauigkeit des Empfängers umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Produkt von Bandbreite und Meßzeit ist (Gl. 3 im 1. Teil), muß die Meßzeit beim Umschalten der Bandbreite von 30 auf 15 kHz verdoppelt werden, um dieselbe Meßgenauigkeit zu erhalten. Eine Reduzierung der gemessenen Linienprofile auf die Bandbreite Null ist in jedem Fall erforderlich; daher wird man zur Beobachtung zweckmäßigerweise die größte Bandbreite wählen, bei der gerade noch alle Strukturen eines Linienprofils erkennbar sind. Zunächst wurde versucht, diese Bandbreite experimentell zu bestimmen, indem wir von 62 mit Bandbreite 30 kHz gemessenen Profilen 10 Profile auswählten, deren Feinstruktur besonders ausgeprägt schien. Diese Profile wurden erneut, diesmal mit einer Bandbreite von 15 kHz gemessen. Wir fanden zwar, daß sich die Feinstruktur bei den 15-kHz-Profilen noch deutlicher heraus hob. In keinem Fall aber ergaben die 15-kHz-Registrierungen Feinstrukturen, die nicht auch schon in den 30-kHz-Registrierungen zu beobachten gewesen

wären. Bild 21 zeigt zwei besonders strukturreiche Profile, die mit Bandbreiten 30 kHz und 15 kHz registriert wurden. Bild 3 in Heft 122 zeigt das Profil $l = 50^\circ, b = 0^\circ$ mit Bandbreiten von 30 und 15 kHz gemessen. An die maximale Strahlungstemperatur dieses Profils sind alle holländischen Linienmessungen angeschlossen [21]. Mit dem 7,5-m-Teleskop ergab sich eine Strahlungstemperatur von 100°K . Die Strahlungstemperaturen, die mit dem Leidener***) bzw. mit dem Bonner 25-m-Teleskop gemessen wurden, sind als Funktion der Empfängerbandbreite in Bild 22 eingezeichnet und stimmen gut überein.

Nicht ganz so gut ist die Übereinstimmung in der Form der Hauptmaxima. In den Bonner Registrierungen wird das Hauptmaximum als Doppellinie aufgelöst (Bild 3), in den Leidener

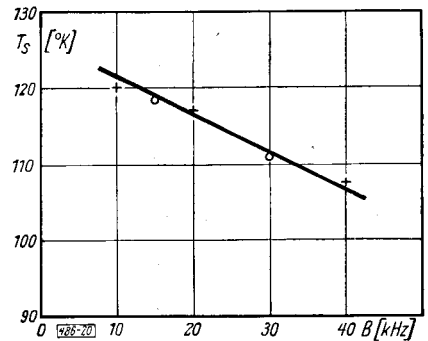


Bild 22: Max. Linientemperatur des Profils $l = 50^\circ, b = 0^\circ$ (+++ vorl. Meßwerte Leiden) (oo Meßwerte Bonn)

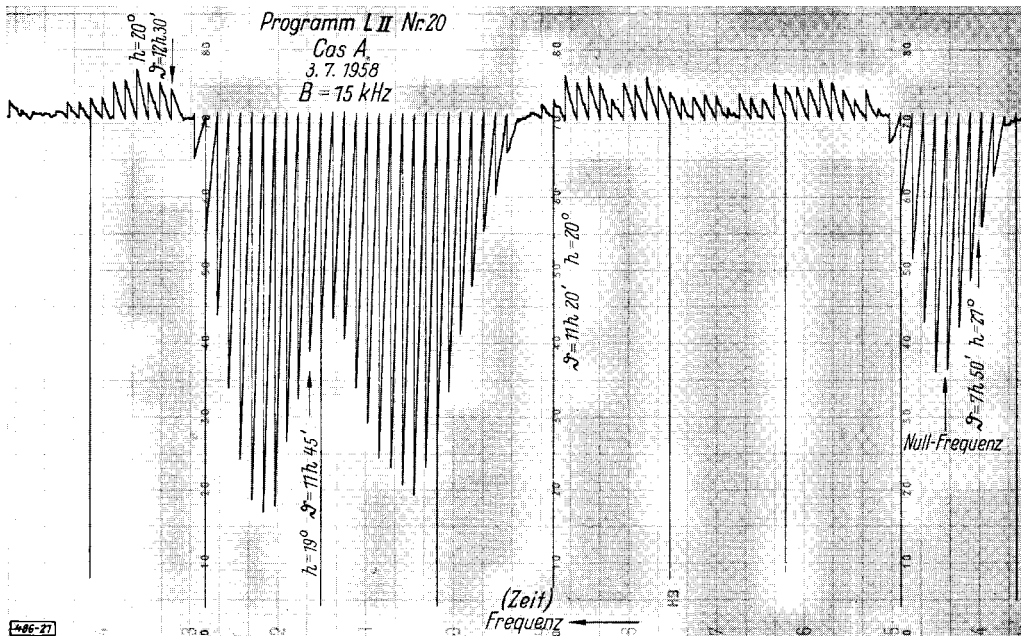


Bild 23: Absorptionsspektrum in Cas A. $B_u = 15 \text{ kHz}, t_m = 4 \text{ min}, D = 3,8 \text{ kHz}$

***) Die hier erwähnten Messungen mit dem holländischen 25-m-Teleskop wurden uns freundlicherweise von den Herren Dr. Muller und Dr. Westerhout zur Verfügung gestellt.

Registrierungen (Bild 4) dagegen als breite, stark unsymmetrische Einzellinie. Auch das vierte, niederste der Linienmaxima ist bei den Leidener Registrierungen weniger ausgeprägt. Dieser Effekt ist noch nicht geklärt, hängt aber möglicherweise mit den verschiedenen Meßverfahren zusammen. [s. ***] auf S. 32].

c) Absorptionsspektren

Die 21-cm-Linie wird im allgemeinen als Emissionslinie beobachtet. Nur in den Fällen, in denen sich eine starke Radioquelle hinter den beobachteten Wasserstoffwolken befindet, mißt man die Wasserstofflinie in Absorption. Beim Differenzmeßverfahren mißt im Falle einer Absorptionslinie der Linienempfänger eine „negative“ Linientemperatur; tatsächlich kehrt sich das Vorzeichen der gleichgerichteten Rauschspannung hinter dem Phasendetektor um, ebenso wie das Ausgangssignal des Integrators, wie man am Absorptionsspektrum der Radioquelle Cas A (Bild 23) bzw. Sgr A (Bild 24) deutlich erkennt. Es werden nur die Linien der Wasserstoffwolken in Absorption gemessen, die vor der Radioquelle liegen. Aus den Absorptionsspektren lassen sich daher Minimalentfernungen für die entsprechende Radioquelle angeben. Außerdem läßt die Form der Absorptionslinie Rückschlüsse auf den Mechanismus der Linienverbreiterung zu [22]. Bei diesen Absorptions-

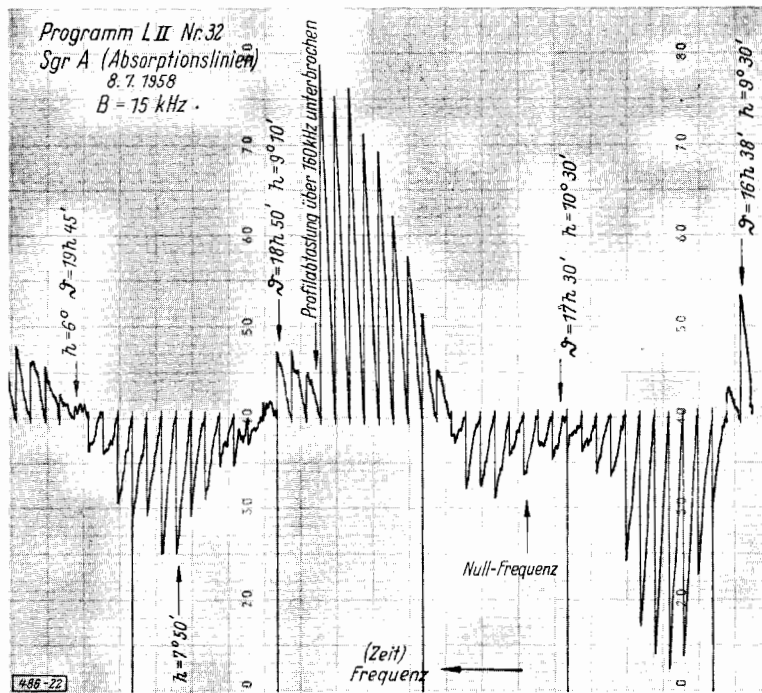


Bild 24: Absorptionsspektrum in Sgr A. $B_u = 15$ kHz, $t_m = 4$ min, $D = 3,8$ kHz

messungen kann sich ein Abgleicheffekt sehr störend auswirken, auf den wir bereits in Abschnitt A 2 hinwiesen. Der Abgleich der Mischstufe ist nur dann einwandfrei, wenn die Nulllinie des Empfängers davon unabhängig ist, ob die Antenne oder ob ein Absorber auf den Empfängereingang geschaltet wird. Andernfalls wird die zusätzliche Kontinuumstrahlung der Radioquelle die Profilmessung erheblich verfälschen.

d) Extragalaktische Linienstrahlung

Die Beobachtung der Linienstrahlung benachbarter Galaxien steht noch in ihren Anfängen, doch sind bereits die ersten Resultate [23] sehr ermutigend. Die Struktur der Profile wird durch die Rotation der beobachteten galaktischen Systeme bedingt. Zusätzlich überlagert sich den Profilen aber noch eine Doppler-

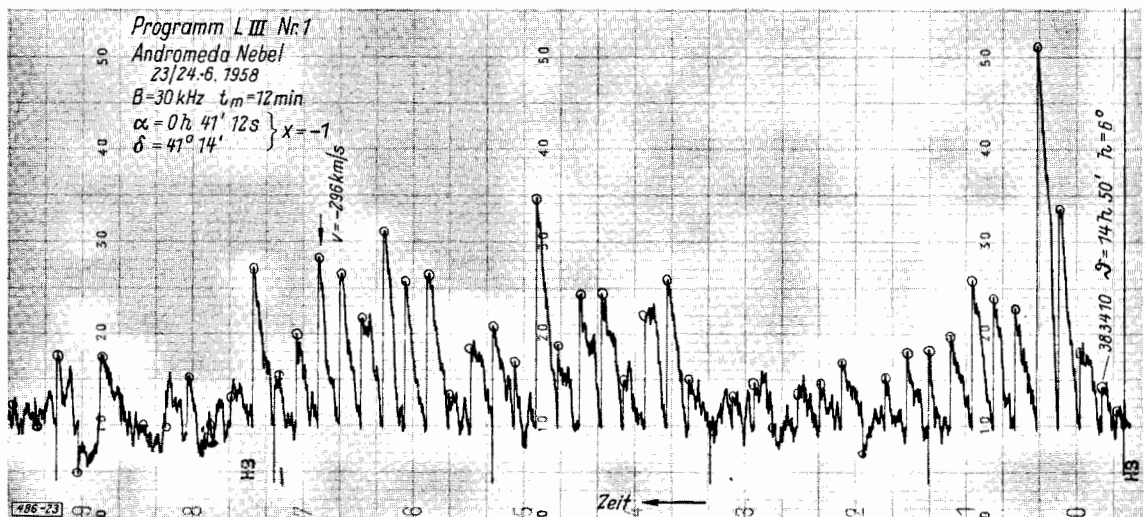


Bild 25: Extragalaktische Linienstrahlung vom Andromedanebel $B_u = 30$ kHz, $t_m = 12$ min, $D = 38,4$ kHz. Position $x = -1$ nach [23]. $\alpha = 0h41m12s$, $\delta = 41^\circ 14'$

verschiebung, die durch die Eigenbewegung des beobachteten Systems relativ zu unserem Milchstraßensystem verursacht wird. Die beobachteten Linientemperaturen sind sehr niedrig; die maximalen Strahlungstemperaturen des Andromedanebels, des uns nächsten Sternsystems auf der nördlichen Halbkugel, beträgt etwa 4° K. Bei den uns bekannten Messungen der extragalaktischen Linienstrahlung wurde ein Direktmeßverfahren angewendet; die Linienstrahlung, die von einer bestimmten Stelle des beobachteten Nebels bei einer bestimmten Frequenz emittiert wird, wird mit der Strahlungstemperatur einer Stelle außerhalb des Nebels verglichen. Dagegen erlaubt unser Meßverfahren eine Umtastmessung auch der Linienstrahlung des Andromedanebels (Bild 25). Dieses Profil wurde mit einer Bandbreite von 30 kHz gemessen; die Integrationszeit pro Frequenzpunkt betrug 12 Minuten. Von der technischen Seite her gesehen stellt die Messung der extragalaktischen Linienstrahlung die höchsten Forderungen an die Konstanz des Empfängers. Wir glauben, daß damit auch eine gewisse Grenze erreicht sein dürfte, die mit konventionellen Überlagerungsempfängern nicht überschritten werden kann. Neue Möglichkeiten werden sicher auch hier durch Wanderfeldverstärker und Molekularverstärker eröffnet.

An den obenerwähnten Messungen waren die Herren *Fischer, Grahl, Schäfer* und *Schnakenburg* beteiligt. Unser besonderer Dank gilt den Herren Prof. *Becker* und Prof. *Straßl* für ihre Förderung und Hilfe bei der Ausführung dieser Meßreihen.

Literatur

- [1] Telefunken-Zeitung Jg. 29 (Sept. 1956) H. 113.
- [2] B. H. *Grahl*: Die Positionsgenauigkeit des 25-m-Radioteleskops der Sternwarte Bonn. Telefunken-Zeitung Jg. 31 (Dezember 1958) H. 122, S. 226...232.
- [3] C. A. *Muller*: Ein Empfänger für die Radiostrahlung des interstellaren Wasserstoffs. Teil I: Die Untersuchung der Wasserstoffstrahlung. Philips Techn. Rundschau Jg. 17 (April 1956) Nr. 10, S. 317...327; Teil II: Aufbau des Empfängers. Philips Techn. Rundschau Jg. 17 (Mai 1956) Nr. 11, S. 361...373.
- [4] P. A. *Mann* und P. G. *Mezger*: Das Auflösungsvermögen der HF-Empfangsanlage des Radio-Teleskops. Telefunken-Zeitung Jg. 29 (Sept. 1956) H. 113, S. 182...191.
- [5] P. G. *Mezger*: Verzerrung radioastronomischer Beobachtungen durch Antennencharakteristik und RC-Tiefpaß. Z. Instrumentenkunde (Nov. 1958) H. 11, S. 219...227.
- [6] P. G. *Mezger*: Der absolute Strahlungsfluß einiger Radioquellen bei 1419 MHz. Z. für Astrophysik. 46 (1958) S. 234 ... 244.
- [7] F. *Fürstenberg* und H. *Prinzler*: Beitrag zur Strahlungsabsolutmessung. Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (Klasse f. Mathematik, Physik und Technik) Nr. 3 (1955).
- [8] K. W. *Grimm*: Ein Spektrometer im 20-cm-Bereich mit extrem hoher Auflösung und höchster Empfindlichkeit. Telefunken-Zeitung Jg. 29 (Sept. 1956) H. 113, S. 191...198.
- [9] *) E. *Schüttlöffel*: Überlegungen und elektrische Messungen für die Antenne auf dem Stockert. Erscheint demnächst in Telefunken-Zeitung.
- [10] Ch. L. *Seeger*, G. *Westerhout* und H. C. *van de Hulst*: The flux densities of some radio sources at 400 Mc/s. Bull. Astronomical Inst. Netherlands. 13 (1956) H. 89.
- [11] P. G. *Mezger*: Die Ausmessung großer Parabolspiegel mit radioastronomischen Mitteln am Beispiel der 25-m-Antenne der Radiosternwarte Stockert. Erscheint demnächst Telefunken-Zeitung.
- [12] G. *Mainka*: Refraktion und Extinktion in der Atmosphäre. Institutsbericht der Radiosternwarte Stockert vom 11. 10. 1957.
- [13] P. G. *Mezger*: Die thermische Radiostrahlung des Erdbodens und der Atmosphäre bei 1420 MHz und ihr Einfluß auf das Antennenrauschen. Z. für angew. Physik Band 11 (Febr. 1959) H. 2 S. 41...46.
- [14] E. *Le Roux*: Thèse présentée à la faculté des sciences de l'Université de Paris.
- [15] G. *Westerhout*: A survey of the continuous radiation from the galactic system at a frequency of 1390 Mc. Bull. Astronomical Inst. Netherlands 14 (1958) Nr. 488 S. 215.
- [16] J. P. *Hagen*, E. F. *McClain* und N. *Hepburn*: Detection of discrete radio sources at 21 cm wavelength. Proc. IRE 42 (1954) S. 1811.
- [17] J. H. *Piddington* und H. G. *Minett*: Microwave thermal radiation from the moon. Astr. J. Sci. Res. A. 2.63 (1949).
- [18] P. G. *Mezger* und H. *Straßl*: The thermal Radiation from the Moon at 1419 Mc/s. Erscheint in der Zeitschrift Planetary and Space Physics.
- [19] A. J. *Wesselink*: Heat conductivity and nature of the Lunar surface. Bull. Astronomical Inst. Netherlands 10 351 (1948).
- [20] Galactic Structure determined from 21-cm-Observations. Bull. Astronomical Inst. Netherlands 13 (Mai 1957). Nr. 475.
- [21] C. A. *Muller* und G. *Westerhout*: A catalogue of 21-cm-line profiles. Bull. Astronomical Inst. Netherlands 13 (Mai 1957) S. 155.
- [22] C. A. *Muller*: Absorption effects in the spectra of two strong radio sources. A.P.J. Vol. 125 Nr. 3 (Mai 1957).
- [23] H. C. *van de Hulst*, E. *Raimond* und H. *van Woerden*: Rotation and density distribution of the Andromeda Nebula derived from observations of the 21-cm-line. Bull. Astronomical Inst. Netherlands 14 (November 1957). Nr. 480.
- [24] Report to URSI Commission V from Sub-Commission. Vd (Juni 1957).

Ergänzende Fußnote im Sonderdruck

*) Eine von E. *Willwacher* vorbereitete Arbeit über den Empfänger erscheint demnächst an anderer Stelle. — Die Probleme der Empfängereingangsschaltung, die beim Linienempfang auftreten, wurden z.B. von P. G. *Mezger* in einem Vortrag während der Tagung der Phys. Gesellschaft der DDR vom 8. bis 11. 10. 1956 in Leipzig diskutiert; die schriftliche Fassung dieses Vortrages findet sich in dem Sammelband: Probleme des Plasmas in Physik und Astronomie, Akademie-Verlag, Berlin 1958.