

MPAE-T-70-93-26

**92 GHz-Radiometer zur Messung des integralen  
Wasserdampfgehaltes der Troposphäre**

A. Loidl, C. Römer  
unter Mitarbeit von M. Güll

September 1993



## 92 GHz-Radiometer zur Messung des integralen Wasserdampfgehaltes der Troposphäre

A. Loidl, C. Römer  
unter Mitarbeit von M. Güll

Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAe)  
Postfach 20  
D-37189 Katlenburg-Lindau  
Bundesrepublik Deutschland

September 1993

### **Kurzfassung**

Es wird ein Millimeterwellen-Radiometer beschrieben, welches zur Messung der Kontinuumsstrahlung der Erdatmosphäre bei 92 GHz benutzt wird. In Verbindung mit anderen Radiometern soll es zur Bestimmung des integralen Wasserdampfgehaltes der Troposphäre und zur Beobachtung von atmosphärischen Wellen eingesetzt werden.

### **Abstract**

A millimeterwave-radiometer is described which is provided to measure the continuum-radiation of the earth's atmosphere at 92 GHz. In connection with other radiometers it shall be used for the determination of the integrated water vapor content of the troposphere and the observation of atmospheric waves.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufbau des Radiometers	2
3	Radiometersteuerung	4
4	Quasioptischer Teil	5
5	Eichlasten	6
6	Meßergebnisse	7
7	Anerkennung	10
8	Literaturverzeichnis	11
9	Anhang	12

# 1 Einleitung

Für die Fernmessung atmosphärischer Spurengase im Millimeter- und Submillimeterbereich vom Boden aus ist die Kenntnis des stark veränderlichen Wasserdampfgehaltes der Troposphäre von großer Wichtigkeit, da das beobachtete Signal durch den Wasserdampf stark gedämpft wird. Eine sehr gut geeignete Methode zur Bestimmung des integralen Wasserdampfgehaltes ist die Millimeterwellenradiometrie [1,2,3]. Eine Zeitauflösung wie sie die Radiometrie bietet, kann von keiner anderen Meßmethode unter vergleichbarem Aufwand geliefert werden. Von E. Westwater wurde gezeigt [4], daß bei einer Frequenz von 90 GHz gute Ergebnisse erzielt werden, wenn H. Liebes MPM Modell [5] für Wasserdampf zugrunde gelegt wird. Dabei werden zur Berechnung der Absorption alle Wasserdampf-Spektrallinien unter 1000 GHz und die Van-Vleck-Weisskopf Linienform herangezogen. Zusätzlich wird ein "Kontinuums"-term zum Linienbeitrag addiert, der den Anteil von Linien über 1000 GHz berücksichtigt.

Eine weitere Anwendung des Radiometers ist die Beobachtung von atmosphärischen Wellen, die sich in einer veränderten Wasserdampfdichte spiegeln [6,7]. Da ein 1990 gebautes 92 GHz-Radiometer [8] in Argentinien (Universität Mendoza) im Einsatz ist, wurde ein zweites Gerät entwickelt. Dabei wird jetzt zur Strahltransformation anstelle einer Linse ein elliptischer Spiegel verwendet. Das Radiometer ist relativ klein und kann daher auch bei einem mobilen Einsatz leicht transportiert werden.

## 2 Aufbau des Radiometers

Das Blockschaltbild des als "Total-Power"-Radiometer konzipierten Gerätes ist in Abb. 1 dargestellt.

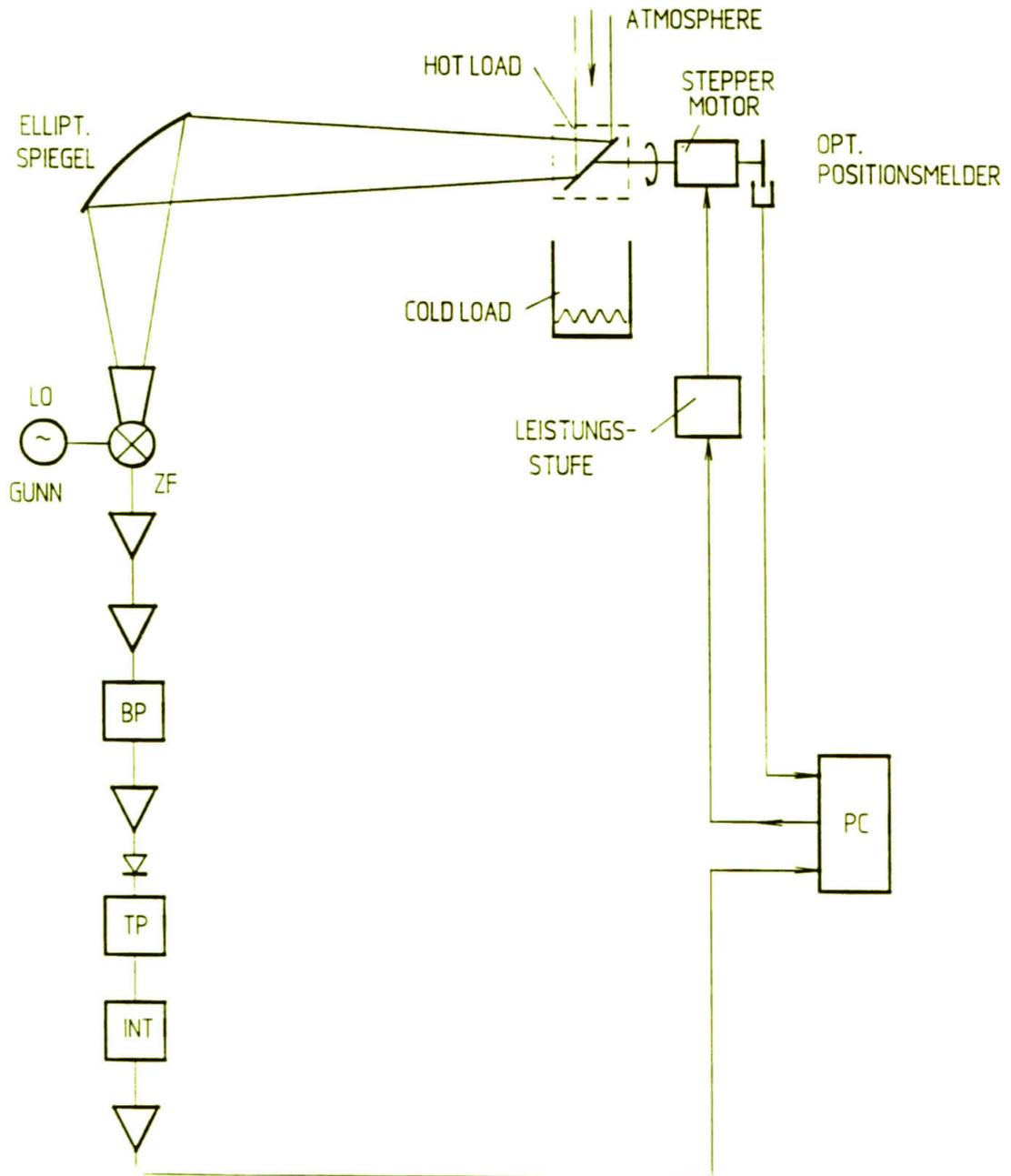


Abb. 1

Der Strahl aus der Atmosphäre wird über einen drehbaren Planspiegel und einen elliptischen Spiegel zum Gegentaktmischer geführt. Der Zenitwinkel ist über den Planspiegel einstellbar, der von einem Schrittmotor rechnergesteuert gedreht wird. Der Rechner fragt die Spiegelposition über einen optischen Positionsmelder ab. Zur Eichung kann der Spiegel auch in Richtung der heißen und der kalten Last gedreht werden. Die Oszillatorfrequenz wird von einem freilaufenden Gunn-Oszillator erzeugt. Das ZF-Signal von 1.4 GHz wird verstärkt, von einem Bandpass auf 600 MHz Bandbreite begrenzt und in einem Tunneldioden-Detektor mit quadratischer Kennlinie gleichgerichtet. Dieses Signal wird nach Filterung in einem Tiefpass und Vorintegration in einem Analogintegrator vom Rechner abgefragt, wo die Meßwerte dann weiterverarbeitet werden.

Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau des Radiometers.

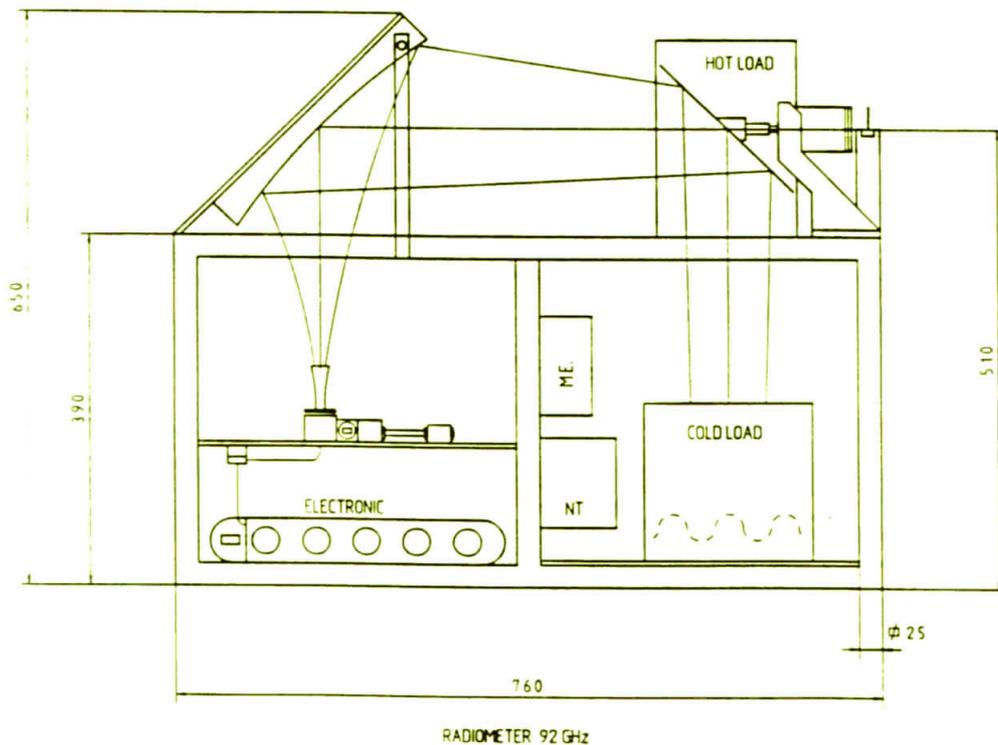


Abb. 2

### 3 Radiometersteuerung

Zur Steuerung des Radiometers kommt ein tragbarer Personalcomputer zum Einsatz. Seine kleinen Abmessungen und sein geringes Gewicht machen ihn für einen mobilen Einsatz besonders geeignet. Ein freier Steckplatz des Rechners nimmt eine im Institut entwickelte und gefertigte Elektroniksteckkarte auf. Diese ist in Wire-Wrap-Technik ausgeführt und enthält alle für die Steuerung erforderlichen Systemkomponenten als da sind: ein 4-kanaliges Datenakquisitionssystem, einen 28-Bit Addierer mit Integrationspeicher, die Motorsteuerung und ein Interface zu dem PC. Die 4 Datenakquisitionskanäle sind mit dem Filterausgangssignal des Frontends, mit der Temperaturmessung von THOT und TCOLD und einem Housekeeping-Wert belegt.

Das Interface zu dem PC besteht aus parallelen Eingangs/Ausgangsleitungen (PIO). Im PC wird die Adresse der Prototypenkarte belegt. Durch die Implementierung der PIO's auf die Elektroniksteckkarte entfällt eine gesonderte PIO-Karte.

Die Leistungsmerkmale des Personalcomputers – es handelt sich um einen *LION portable*, also um einen tragbaren Löwen, sind eine 486er CPU, eine 115 MByte Festplatte, zwei Diskettenlaufwerke mit 5,25" und 3,5" sowie zwei seriellen und einer parallelen Schnittstelle. Das Programm WACON.EXE benützt für den Plotter die serielle Schnittstelle COM1. Es stehen somit noch eine serielle und eine parallele Schnittstelle zur allgemeinen Verfügung.

Die gemessene Helligkeitstemperatur wird als Funktion der Zeit am Bildschirm dargestellt. Die Rohdaten sind jedoch auch auf eine Diskette übertragbar und stehen dann für die Weiterverarbeitung zur Verfügung.

## 4 Quasioptischer Teil

Die Atmosphärenstrahlbreite wurde mit 2.5 Grad (3dB) vorgegeben, um eine gute Vergleichsmöglichkeit mit den Meßdaten des in [8] beschriebenen Radiometers und mit dem NOAA 90-GHz Radiometer zu haben.

Für die 3dB Strahlbreite von 2.5 Grad ergibt sich der erforderliche Strahltailienradius zu

$$w_{02} = \frac{\lambda \cdot \sqrt{3}}{9.26 \cdot \tan\theta} = \frac{3.26 \cdot \sqrt{3}}{9.26 \cdot \tan\frac{2.5}{2}} = 27.94 \text{ mm}$$

Da der Tailienradius am Potterhorn des Mischers

$$w_{01} = 1.78 \cdot \lambda = 1.78 \cdot 3.26 = 5.8 \text{ mm}$$

beträgt, ergibt sich bei einem gewählten Abstand  $w_{01}$  zum elliptischen Spiegel von  $d_1 = 280 \text{ mm}$  [8] die erforderliche Brennweite zu

$$\begin{aligned} f_{1,2} &= -\frac{d_1 \cdot w_{02}^2}{w_{01}^2 - w_{02}^2} \pm \left[ \left( \frac{d_1 \cdot w_{02}^2}{w_{01}^2 - w_{02}^2} \right)^2 + \frac{w_{02}^2 \cdot d_1^2 \cdot \lambda^2 + \pi^2 \cdot w_{01}^4 \cdot w_{02}^2}{\lambda^2 (w_{02}^2 - w_{01}^2)} \right]^{1/2} \\ &= 241.7 \text{ mm} \quad (343.5 \text{ mm}) \end{aligned}$$

und der Abstand  $d_2$  von  $w_{20}$  vom Spiegel mit 1130.3 mm. Der Strahltailienradius in 280 mm Entfernung vom Phasenzentrum des Hornes am elliptischen Spiegel beträgt 50.22 mm und bestimmt damit die Größe dieses Spiegels. Der Tailienradius am Drehspiegel beträgt 37.14 mm. In Abb. 3 ist der Strahlengang graphisch dargestellt.

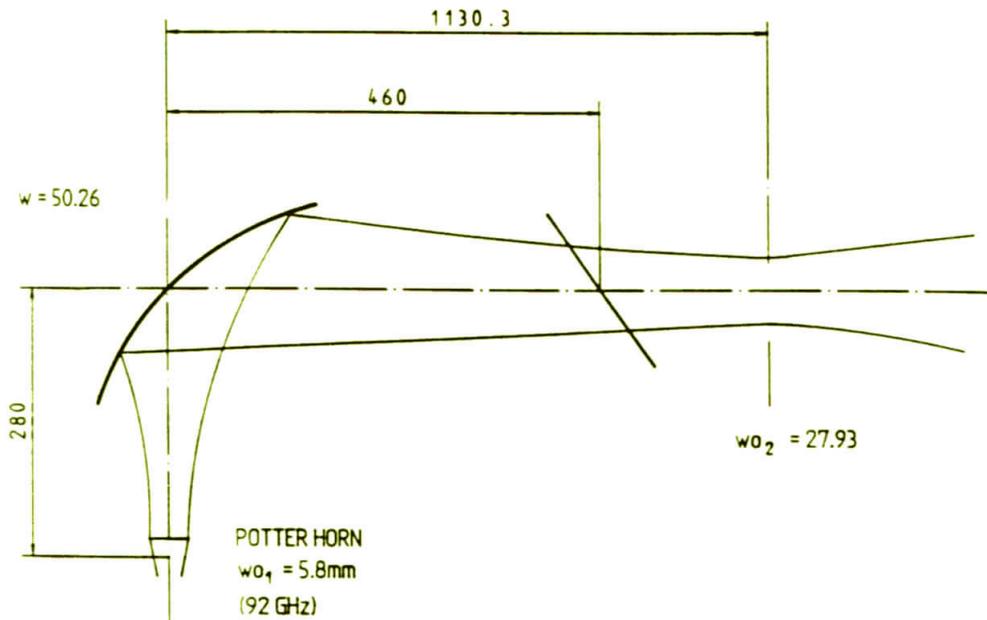


Abb. 3

## 5 Eichlasten

Als kalte Eichlast dient ein mit flüssigem Stickstoff gekühlter Absorber. Die heiße Eichlast bildet ein auf Raumtemperatur befindlicher Absorber. Die Temperatur der Absorber wird mit PT 100 Sensoren gemessen. Obwohl "Baselineripple" bei diesem Radiometer keine große Rolle spielt, wurde trotzdem versucht, ihn durch möglichst reflexfreie Anordnung der Lasten klein zu halten. Dazu wurde an die ZF eine 24 kanalige Filterbank angeschlossen, womit die Welligkeit der "Baseline" gemessen wurde. Durch Verbesserung der Lasten konnte der "Ripple" auf  $\pm 1,5\text{ K}$  reduziert werden.

## 6 Meßergebnisse

Nach Justierung der quasioptischen Anordnung mit einem Laser und einem in zwei Achsen verschiebbaren Sender (Harmonischer Generator mit Pyramidalhorn) wurde ein  $y$ -Faktor von 1.10 bestimmt. Damit ergibt sich die Empfänger-Rauschtemperatur mit

$$T_{Emp} = \frac{T_H - yT_{BC}}{y - 1} = \frac{293 - 1.1 \cdot 75.8}{1.1 - 1} = 2096K(DSB)$$

Die Helligkeits-Temperaturen der kalten und heißen Eichlast wurden dabei nach der Planck'schen Strahlungsgleichung bestimmt.

$$P = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1}$$

$$T_B = \frac{c^2}{2\nu^2 k} \cdot I = P_B$$

$$P_B = \frac{c^2}{2\nu^2 k} \cdot P = T \cdot \frac{a}{e^a - 1}$$

$$a = \frac{h\nu}{kT}$$

$$b = \frac{a}{e^a - 1} = \frac{a}{a + a^2/2! + a^3/3! + \dots} \leq 1$$

$$T_B = T \cdot b(\nu, T)$$

$$T_{BH} = T_H \cdot b = 295.15 \cdot 0.993 = 293$$

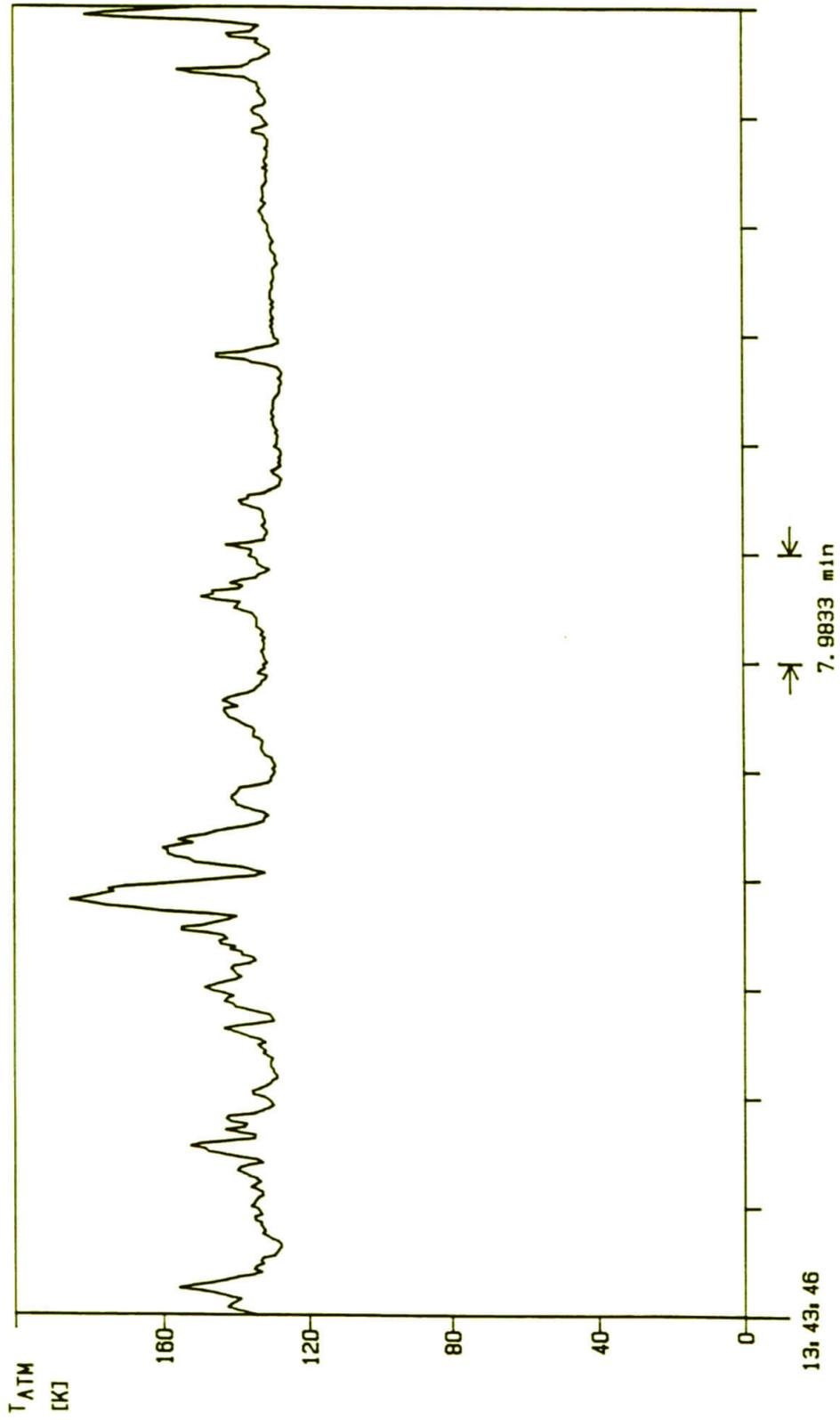
$$T_{BC} = T_C \cdot b = 78 \cdot 0.972 = 75.8K$$

Die Empfänger-Rauschtemperatur ist, bedingt durch den Mischer, um den Faktor 2 größer als bei [8], reicht aber, um kurze Meßzeiten zu erzielen. Für eine Himmelstemperatur von z.B. 60 K ergibt sich zusammen mit der Empfänger- Rauschtemperatur von 2096 K eine Systemrauschtemperatur von 2156 K. Daraus folgt bei einer Empfängerbandbreite von 600 MHz und einer Integrationszeit von 12 Sekunden (d.h. einer Zykluszeit von  $3 \cdot 12 = 36$  Sekunden plus der erforderlichen Zeit für die Spiegeldrehung zwischen den einzelnen Meßphasen) eine Grenzempfindlichkeit von

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{B \cdot \tau}} = \frac{2156}{\sqrt{600 \cdot 10^6 \cdot 12}} = 0.0254 \text{ K}$$

Abb. 4 zeigt als Ergebnis einer ersten Testmessung den Verlauf der Himmelstemperatur über einen Zeitraum von 95 Minuten bei starker Bewölkung.

Durch Einstrahlung von 2 verschiedenen Frequenzen aus einem harmonischen Generator wurde das Seitenbandverhältnis gemessen. Die Empfindlichkeit in den beiden Seitenbändern ist innerhalb der Meßgenauigkeit gleich (Abweichung  $< 1$  dB).



08-12-1993

WASSERDAMPF-KONTINUUM 92 GHz ZENITWINKEL : 60 [GRAD]

Abb. 4

## 7 Anerkennung

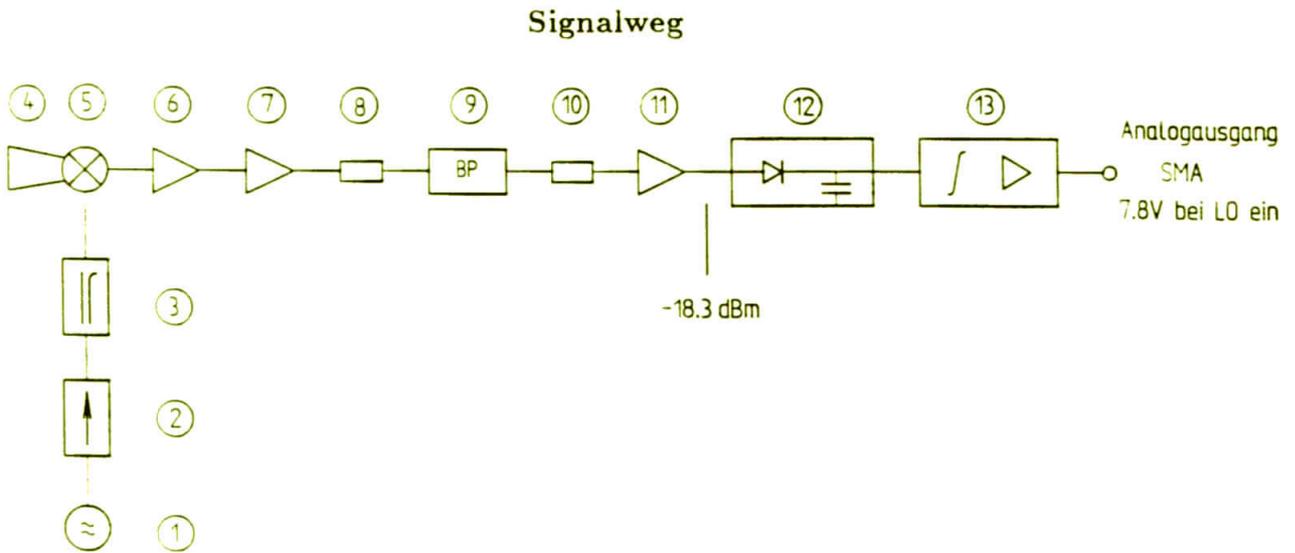
Allen, die uns bei der Ausführung dieser Arbeit behilflich waren, möchten wir herzlich danken. Im Besonderen

- Herrn Dr. G. Hartmann für die Unterstützung und wertvolle Anregungen
- Herrn W. Butschek für die Ausführung der mechanischen Arbeiten
- und nicht zuletzt den Auszubildenden aus der Feingeräte-Elektronik, die einzelne Komponenten aufgebaut und die Verdrahtung und den Zusammenbau des Gerätes vorgenommen haben.

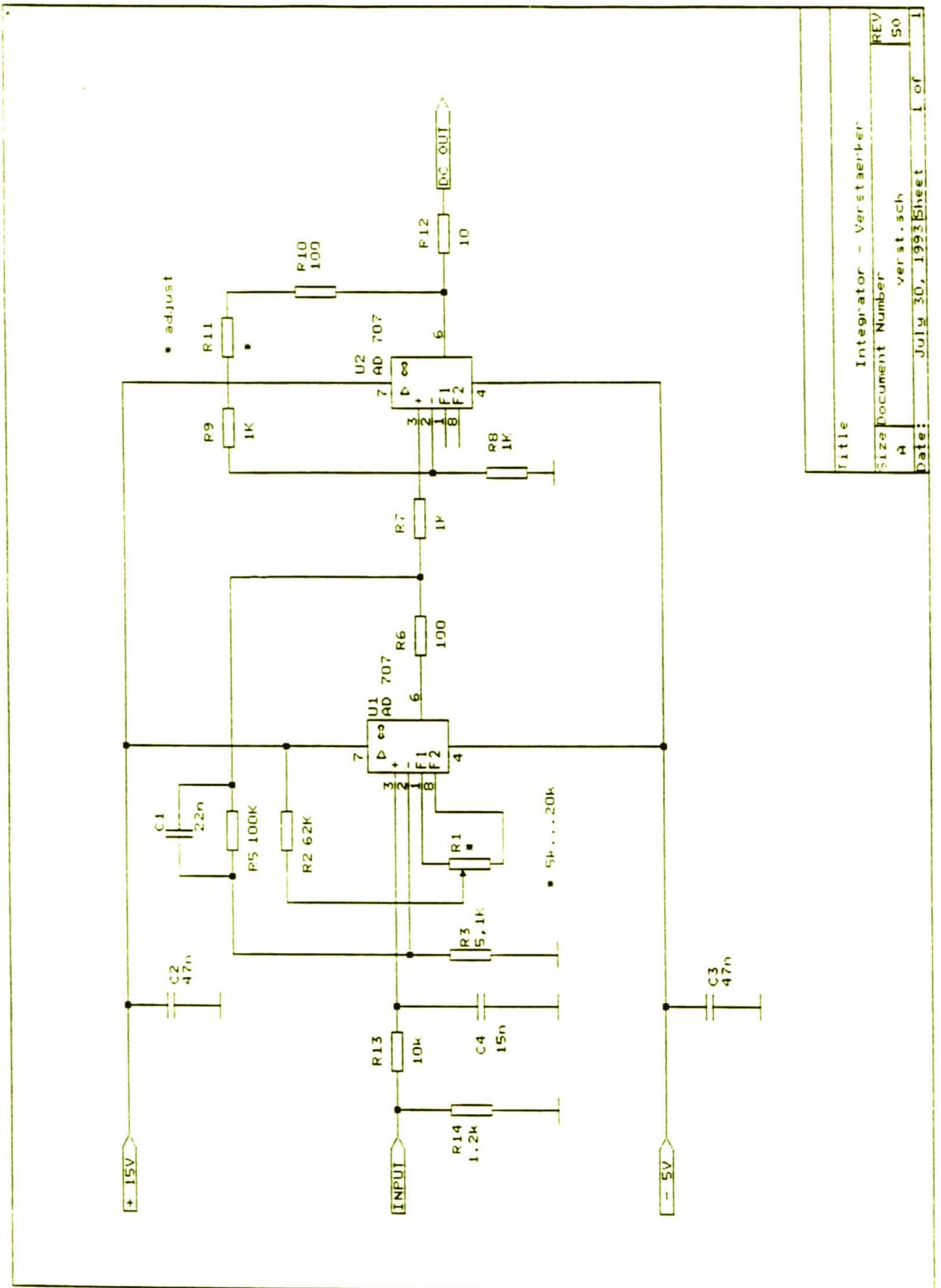
## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Westwater E.R. The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual-frequency ground based microwave radiometry, *Radio Sci.*,13, pp. 677-685, 1978.
- [2] Elgered G.,Rönnäng B.O., Askne J.I.H., *Radio Sci.*, Measurement of atmospheric water vapor with microwave radiometry, *Radio Sci.*,17, pp. 1258-1264, 1982.
- [3] Peter R., Kämpfer N., Radiometric determination of water vapor and liquid water and its validation with other techniques, *J. Geophys. Res.* Vol. 97, NO. D16, pp. 18.173-18.183. 1992.
- [4] Westwater E.R. et al, Ground based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65 and 90 GHz: a coparison of measurements and theory, *IEEE Trans. Antennas Prop.* Vol. 38, No 10, Oct. 1990.
- [5] Liebe H.J., MPM - an atmospheric millimeter-wave propagation modell, *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, Vol. 10, 1989.
- [6] Canavero F.G. et al, Interpretation of ground-based radiometric observations in terms of a gravity wave model. *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, D6, pp. 7637-7652, 1990.
- [7] Loidl A. et al, Ground-based radiometric observation of short-period atmospheric waves, *MPAE-W-70-91-22*.
- [8] Loidl A., Römer C., 92 GHz-Radiometer zur Messung des Wasserdampfgehaltes der Troposphäre, *MPAE-T-70-90-38*, 1990.

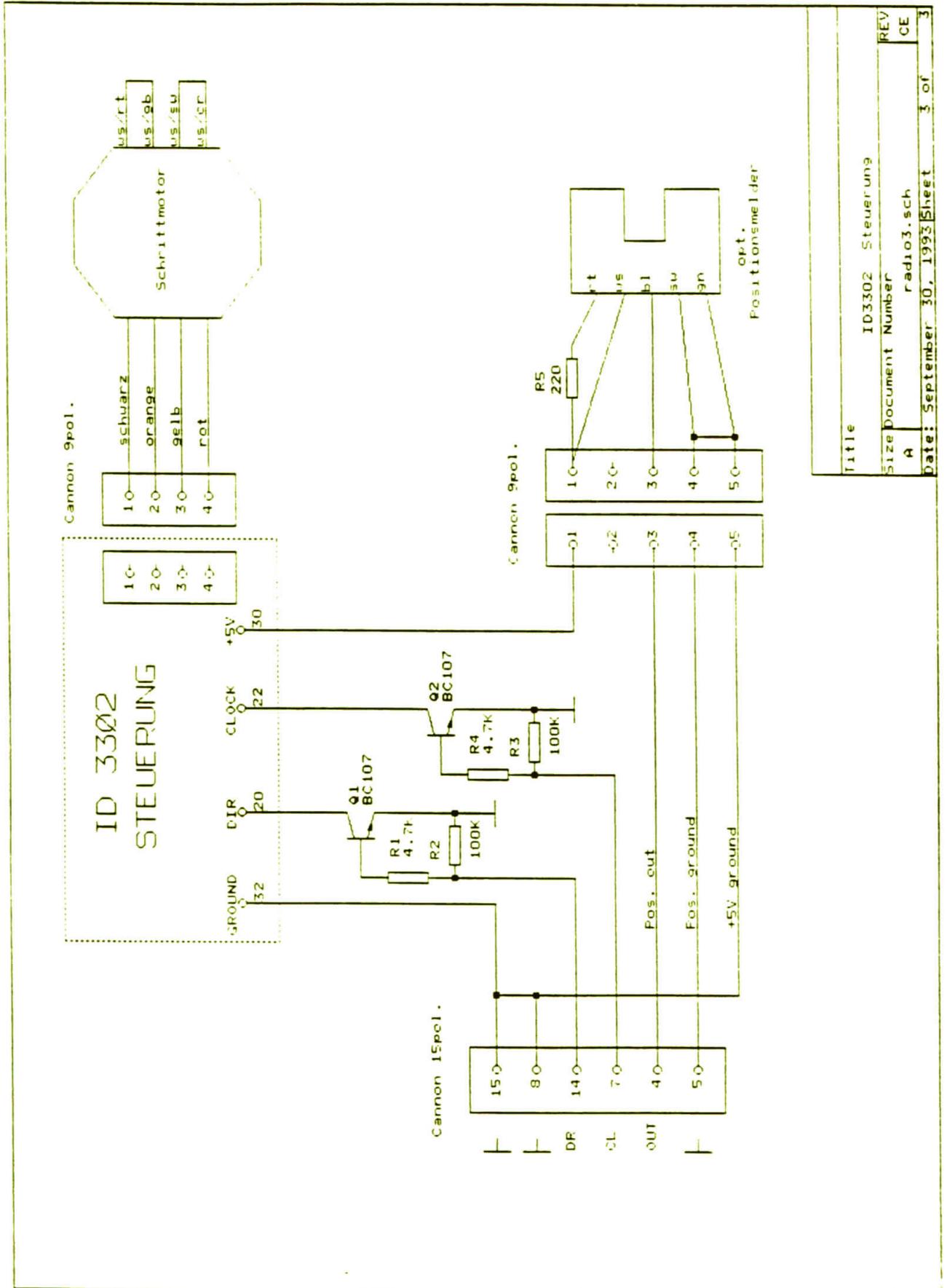
## 9 Anhang



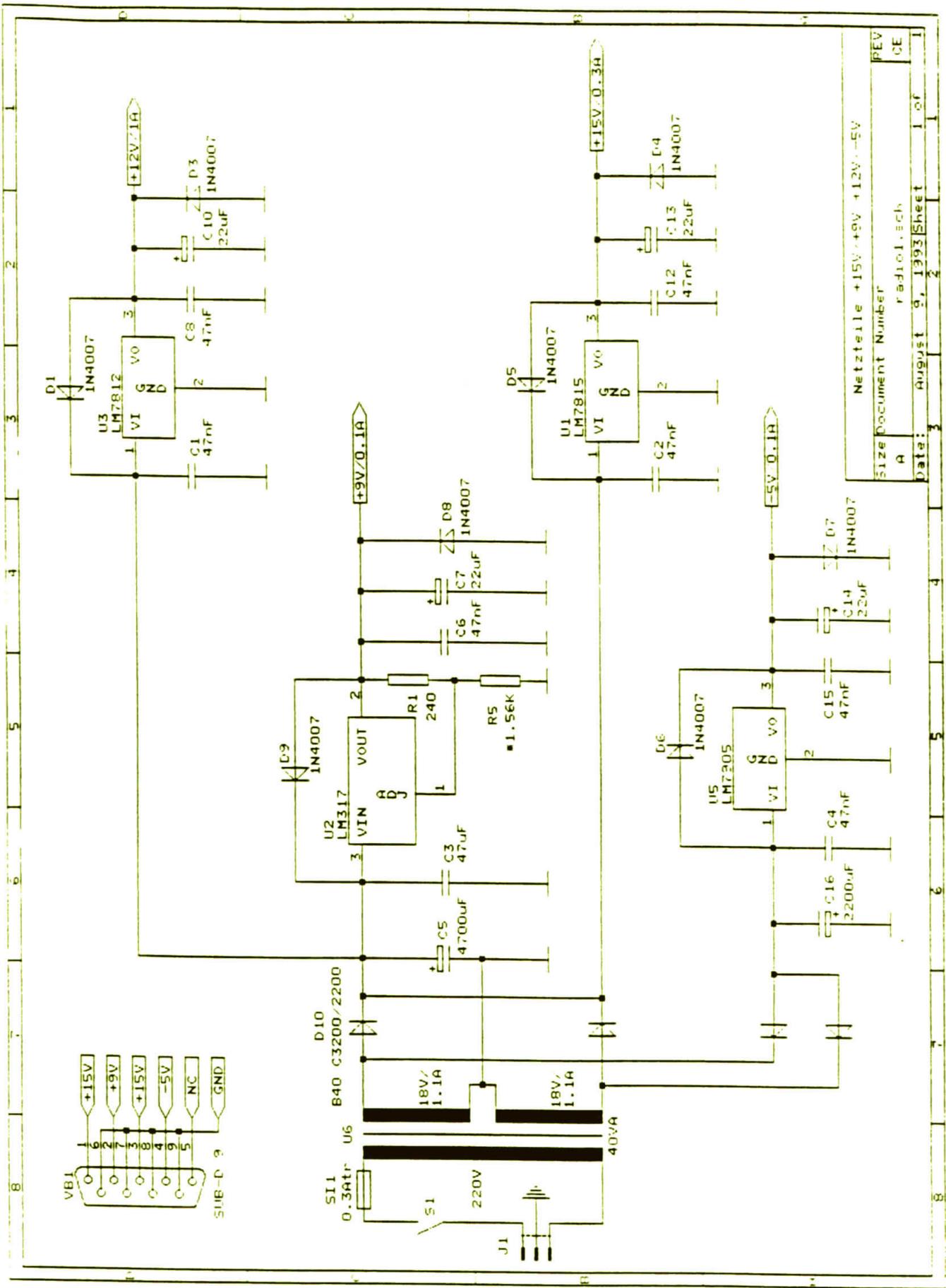
1. Gunn-Oszillator, Mod. OSW SN.04, Amtron
2. Isolator, Mod. 451464H-1000, Millitech
3. Koppler, RPG-Radiometer-physics
4. Potter-Horn. RPG-Radiometer-physics
5. Mischer, MXP-10, Millitech
6. Verstärker, AFS 3, Miteq
7. Verstärker, Eigenbau
8. Abschwächer 3dB
9. Bandpass, WHLK 1100/1700 ss, Wainwright Instr.
10. Abschwächer 3dB
11. Verstärker, AFD 2, Miteq
12. Tunneldetektor, ACTP 1501P, Adv. Control Components
13. Integrator & Verstärker, Eigenbau



Title	Integrator - Verstärker
Size	Document Number
REV	50
Date:	July 30, 1993 Sheet 1 of 1

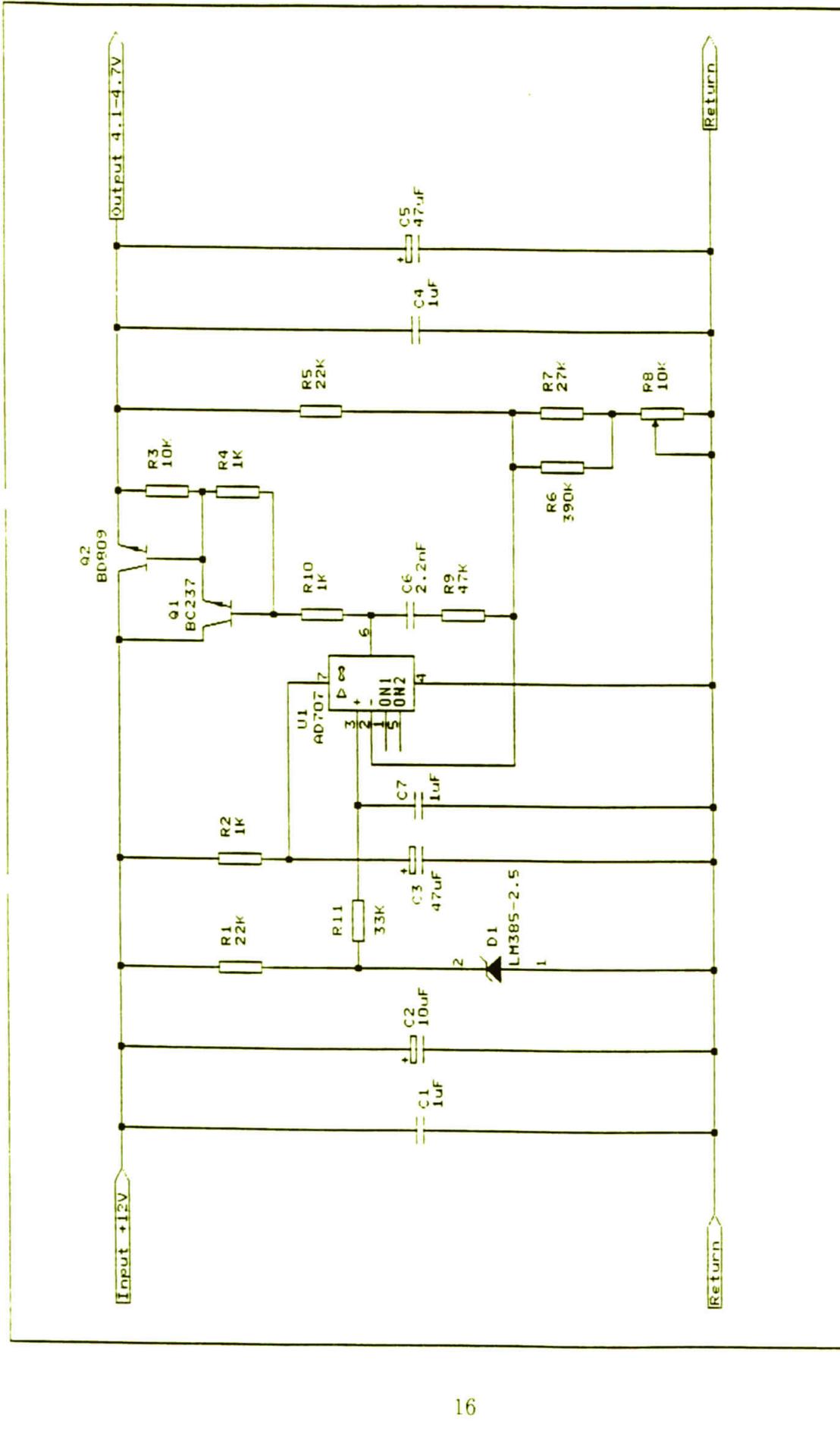


Title		ID3302 Steuerung
Size Document Number		A radio3.sch
REV	CE	3
Date: September 30, 1993		Sheet 3 of 3



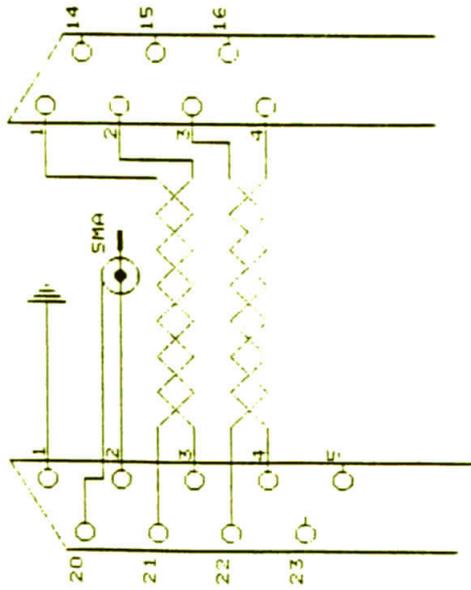
Size	A
Document Number	radiol.ech
Date:	August 9, 1993
Sheet	1 of 1

Netzteile +15V +9V +12V -5V

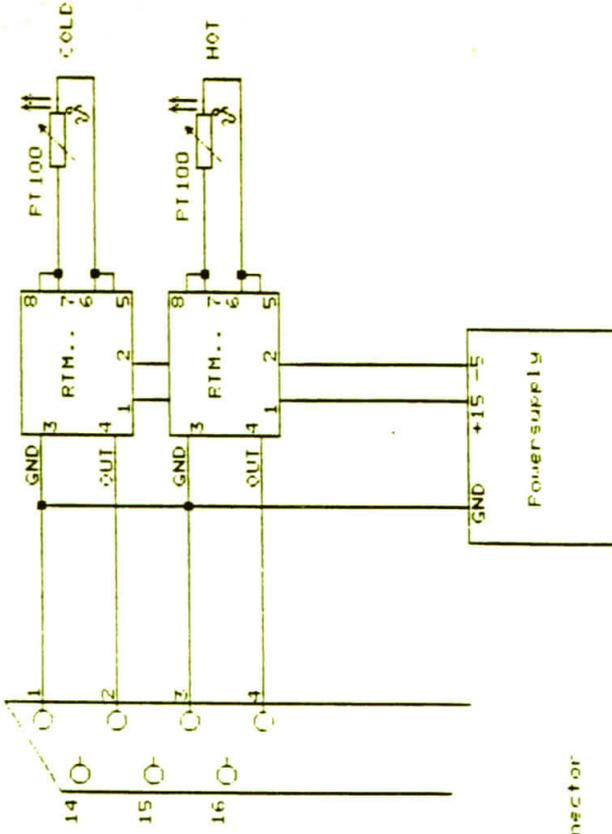


Title	Serienstabilisierung		
Size	Document Number	rad102.sch	REV
	A		CE
Date:	August 10, 1993	Sheet	2 of 2

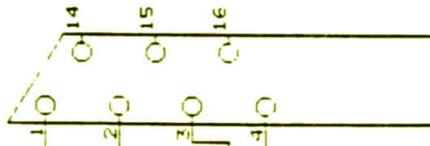
SUB-D 37S



SUB-D 25S



SUB-C 25P



Receiver-Connector

HI-Radiometer-Connector

Title	92GHz-Radiom. Connector
Size	Document Number
	A 92GHZ1.sch
REV	MS
Date:	October 7, 1993 Sheet 01