

Prepared by

B. S C H L Ü T E R

Title Thermische Entkopplung und Temperaturstabilisierung der Detektoreinheiten  
- Entwicklung und Tests -

Distribution

## 0. Einleitung

Nach Durchlaufen der CRISTA-Optik erreicht die zu messende Strahlung am Ende der Spektrometer die Austrittsspalte und trifft auf die Detektoren.

Die Betriebstemperaturen der Detektoren liegen bei ca. 3 K (langwellig) bzw. 9 K (kurzwellig), die Umgebungstemperaturen (Spektrometer) bei etwa 7 - 12 K. Aus diesem Grund werden die Detektorblockeinheiten der vier Spektrometer vom Detektortank gesondert gekühlt. Die Standzeit des Tanks soll möglichst lang sein.

Um eine zu schnelle Entleerung des Tanks zu verhindern, müssen neben dem Tank die Detektorblockeinheiten thermisch gut gegen die Umgebung isoliert werden. Dazu wurde ein Aufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Detektorblöcke thermisch entkoppelt und mechanisch stabil auf der Spektrometerdeckplatte zu befestigen.

Zur Temperaturstabilisierung der Detektoren wurde eine Regeleinrichtung entwickelt und getestet. Die Ankopplung der Detektoren an den Detektortank wurde mit einer Drahtlitze realisiert und die Zahl der Litzendrähte optimiert.

Prepared by

Title

Distribution

## 1. Detektoraufbau

### 1.1 Anforderungen an den Detektoraufbau

Um die geforderte Standzeit (18 Tage) des Detektortanks einzuhalten, darf die maximale Wärmelast von 10 mW der Detektorblöcke auf den Tank nicht überschritten werden.

Die Temperaturen der Detektoren während der Mission sind für das langwellige Spektrometer (1) mit 2,5-4 K (gleich Temperatur Detektortank am Anfang-Ende der Mission) und für die kurzwelligen Spektrometer (3) mit (voraussichtlich) durchgehend 9 K (wird durch Zusatzheizung eingestellt) gefordert. Die Temperaturen der Spektrometer sind dabei entsprechend 7-12 K.

Die Detektorblockeinheiten werden zur Kühlung über massive Cu-Stäbe mit nachgeschalteter Cu-Litze mit dem Detektortank verbunden. Die thermische Ankopplung wird dabei je nach geforderter Detektortemperatur über die Zahl der Litzendrähte eingestellt.

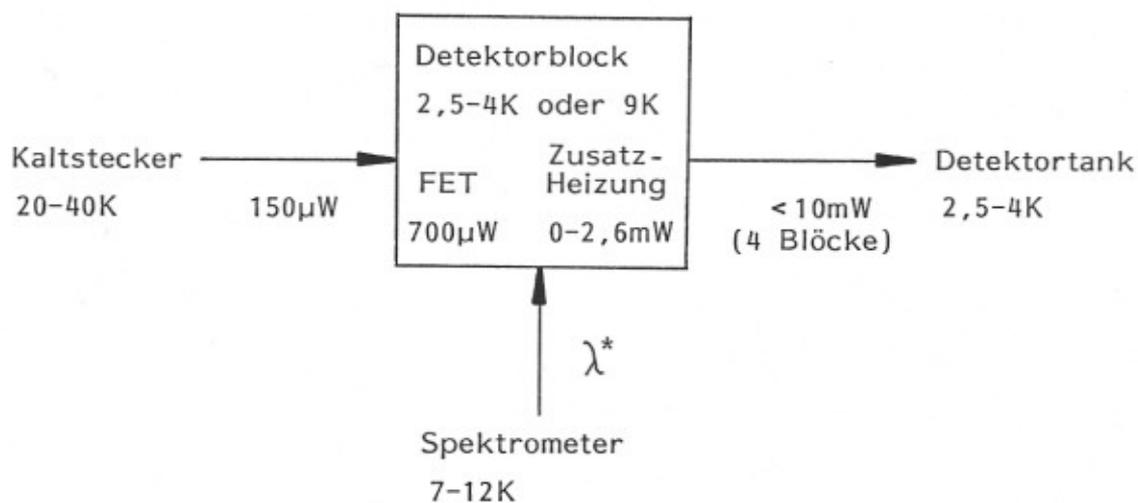
Die elektrische Verlustleistung der Signalverstärker (FET) ist mit 700  $\mu$ W/Block (7 FET/Block) vorgegeben. Die Wärmelast über die Zuleitungen beträgt 150  $\mu$ W/Block.

Prepared by

Title

Distribution

Die Wärmebilanz läßt sich schematisch darstellen:



## 1.2 Detektorblockkonfiguration

Die Detektorblockeinheiten sind aus der Spaltplatte, der Spaltfolie, den Lichtleitern und den Detektorhalterungen mit eingebautem Detektor und Vorverstärker (FET) aufgebaut. Die Bauteile sind in angegebener Reihenfolge mit der Spaltplatte verschraubt. Elektrische Zuleitungen sind über Steckerverbindungen mit den Detektorhalterungen verbunden.

Die Spaltplatte wurde dabei so konstruiert, daß sie durch vier Kugelstützen und entsprechende Haltestruktur auf der Spektrometerdeckplatte befestigt werden kann. Die folgende Skizze zeigt den Aufbau, der die gestellten Anforderungen erfüllt:

Prepared by

Title

Distribution

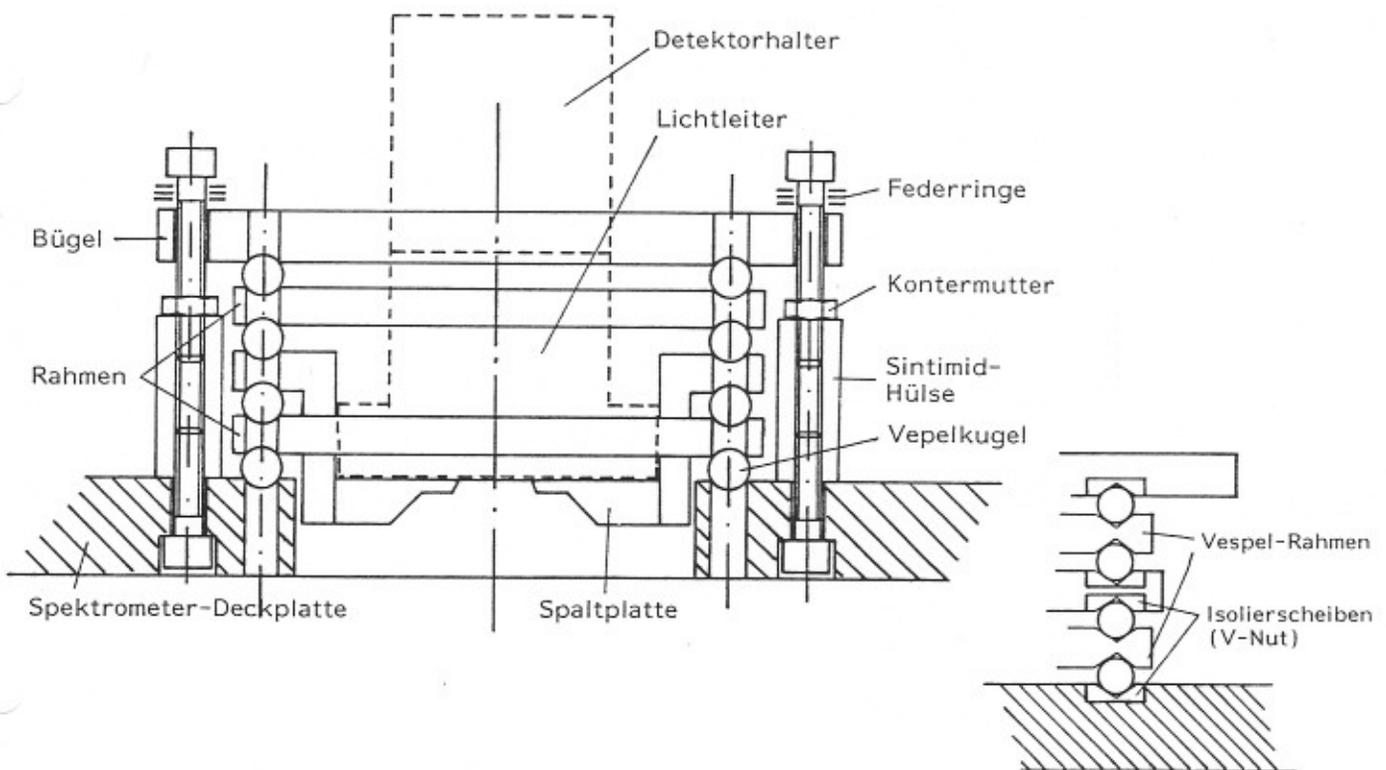


Abb. 1: Aufbau III

Kugelstütze Aufbau I

Um den Wärmeübergang der Kugelstützen zwischen Spaltplatte und Spektrometerdeckplatte zu untersuchen, wurden verschiedene Aufbauten entwickelt und getestet.

Insgesamt konnten neun Aufbauten realisiert werden. Die Anzahl der Kugeln, die Kugelaufgabe und das Material der Zwischenrahmen werden dabei variiert (Vespel-Kugeln bei allen Versuchen). Eine Übersicht gibt folgende Tabelle:

Prepared by

Title

Distribution

	mit Vespel Isolier- scheiben (V-Nut)	mit Vespel Isolier- scheiben (Loch)	ohne Isolier- scheiben (Lochauflage)
mit Vespel			
Zwischenrahmen (4 Kugeln/Stütze)	I	X	X
mit Alu			
Zwischenrahmen (4 Kugeln/Stütze)	X	X	III (doppel)
ohne			
Zwischenrahmen (2 Kugeln/Stütze)	II	X	IV (flach)

Tab. 1: Variationen des Aufbaus

Von den möglichen Konfigurationen wurden nur die mit 0 bezeichneten ausgetestet. Alle anderen Aufbauten erwiesen sich als instabil oder zu aufwendig im Zusammenbau. Durch Fertigungstoleranzen und Probleme bei der Sintimidbearbeitung erreichten die Aufbauten nicht die mechanischen Anforderungen.

Prepared by

Title

Distribution

Die Schrauben am Bügel wurden mit einem Drehmoment von 18 Ncm angezogen und mit der Kontermutter (1,6 Nm) gesichert. Die untergelegten Federringe (4\*2) sollen unterschiedliche Ausdehnungen von Alu, Stahl und Sintimid im Kalten ausgleichen. Die Spaltplatte wurde bei den Testaufbauten als ebene Platte ausgebildet.

### 1.3 Meßprinzip und Versuchsablauf

Die Aufbauten wurden für die Tests in ein vakuumdichtes Alu-Gehäuse installiert und dieses auf der Kryostat-Grundplatte verschraubt (siehe Abb. 2). Durch einen speziellen Wellenschlauch- oder Stahlrohranschluß konnte bei kaltem Kryostaten und kaltem Gehäuse He-Kontaktgas ins Gehäuse eingelassen werden, um mittels Wärmeleitung über das Gas die isolierte Spaltplatte abzukühlen. Das Kontaktgas wurde nach der Abkühlung abgepumpt.

Im stationären Zustand, d.h. im thermischen Gleichgewicht, ist die einfachste und genaueste Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit einer Probe möglich. Bei der stationären Methode unterliegt die Probe in 1. Näherung einem linearen Temperaturprofil und die Wärmeleitfähigkeit wird direkt über die Messung des Wärmeflusses und des Temperaturgradienten bestimmt.

Prepared by

Title

Distribution

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  läßt sich für kleine  $\Delta T$  berechnen nach:

$$\lambda = \frac{L \cdot \dot{Q}}{A \cdot \Delta T}$$

mit  $\dot{Q}$ : Wärmefluß, A und L: geom. Abmessungen des Wärmeübergangs. Übertragen auf die zu untersuchenden Detektoraufbauten ist es sinnvoll, den Wärmeleitwert  $\lambda^*$

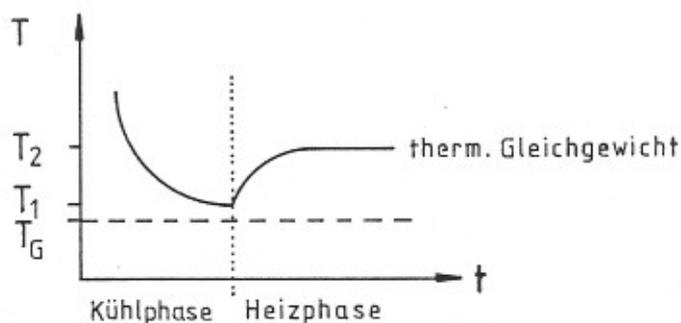
$$\lambda^* = \frac{\dot{Q}}{\Delta T}$$

zu verwenden, da A und L nicht bestimmt werden können.

Ist  $T_G$  die Temperatur der Gehäuse-Grundplatte,  $T_1$  die Starttemperatur der Spaltplatte nach der Kühlung mittels Kontaktgas und  $T_2$  die Temperatur der Spaltplatte bei eingeschalteter Heizung im thermischen Gleichgewicht, so ist  $\Delta T$  zu berechnen nach:

$$\Delta T = (T_2 - T_G) - (T_1 - T_G) = T_2 - T_1$$

Der Versuchsablauf läßt sich mit  $T(t)$  gut verstehen:



Die Meßmethode beinhaltet die Annahme, daß die Vertauschung der Temperaturen am Aufbau gleiche Werte für  $\lambda^*$  liefert.

Prepared by

Title

Distribution

Die Heizleistung  $\dot{Q}$  wurde aus Heizstrom und Spannung am Heizwiderstand ermittelt.

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda^*$  der verschiedenen Aufbauten wurden Temperatursensoren (100 Ohm-Kohleschichtwiderstände) auf der Gehäuse-Grundplatte, auf der Spaltplatte und auf dem Bügel installiert. Zudem wurde ein 10 kOhm-Metallschichtwiderstand als Heizung auf der Spaltplatte befestigt. Die Widerstandsmessungen erfolgten zunächst mittels 4-Draht-Methode um Einflüsse der Zuleitungen auszuschließen. Im Verlauf der Untersuchungen wurde dann bei der Heizung und beim Temperatursensor auf der Spaltplatte auf zwei Meßleitungen verzichtet, um den Wärmeinput über die Leitungen zu minimieren.

Das Aluminiumgehäuse diente neben der Kontaktgasanwendung zur Unterdrückung jeglicher Umgebungsstrahlung, die die Spaltplatte unkontrolliert erwärmen würde.

Der Wärmeinput über das Verbindungsrohr von außerhalb des Kryostaten konnte mit einem geschwärzten Metallplättchen als Strahlenschild am kalten Stahlrohrende abgefangen werden. Die Verwendung des dickeren Wellschlauches, über den das Kontaktgas schneller abgepumpt werden konnte, wurde wegen zu großer Wärmeeinleitung eingestellt.

Prepared by

Title

Distribution

Der Druck des He-Kontaktgases im Gehäuse wurde mit einem Penning-Vakuummeter ( $p_{Luft}$ ) unmittelbar außerhalb des Kryostaten am Stahlrohranschluß gemessen. Der Druck im Gehäuse ist dabei  $p_{He} = 6.5 \cdot p_{Luft}$ . Der Gasdruck direkt am Aufbau wurde nicht meßtechnisch ermittelt.

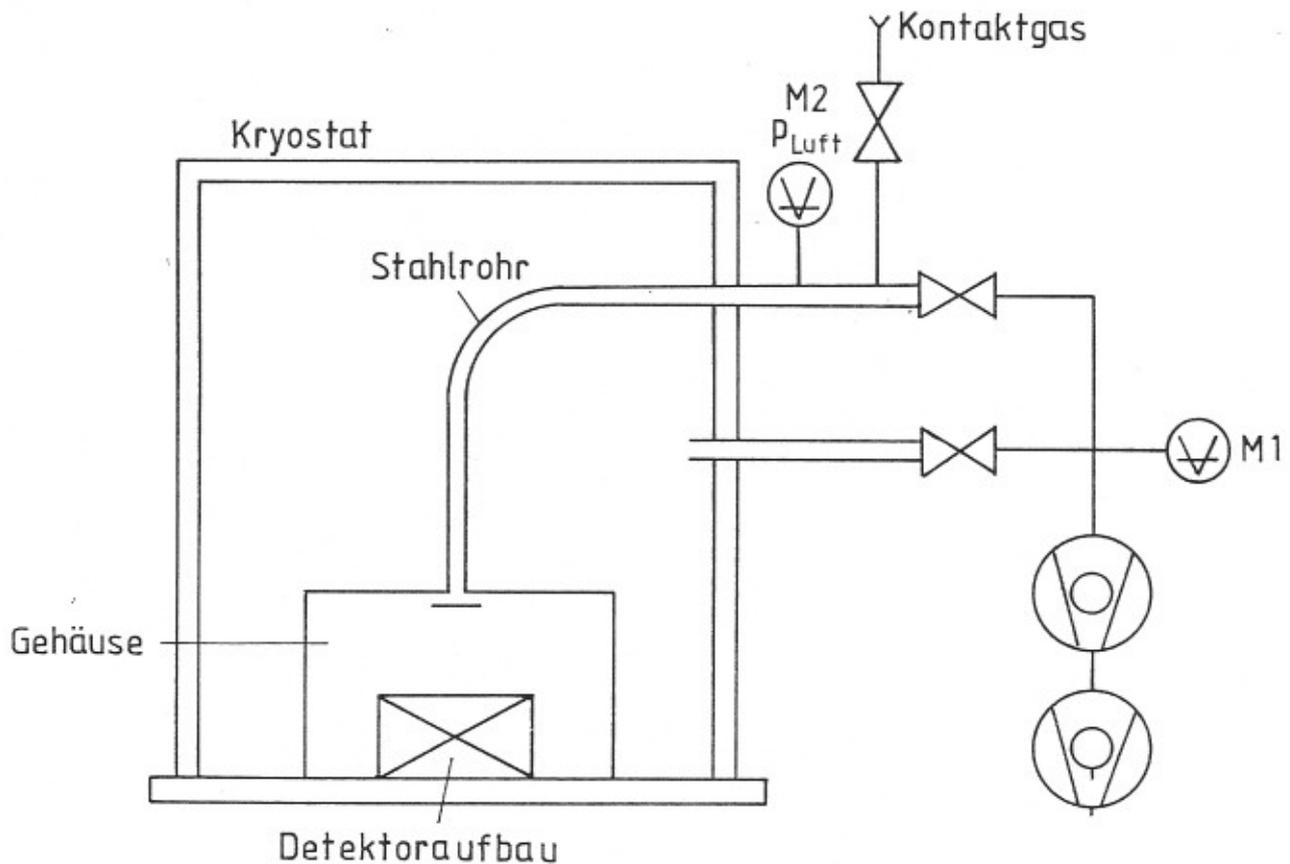


Abb. 2: Skizze der Versuchsanordnung

Prepared by

Title

Distribution

#### 1.4 Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Teil der Messung wurden alle störenden Einflüsse auf die Messung der Wärmeleitfähigkeit minimiert und die Abhängigkeit einstellbarer Randbedingungen (Gasdruck, Temperatur, Heizleistung) auf die Meßergebnisse untersucht.

##### 1.4.1 Auswertung in 1. Näherung

###### 1.4.1.1 Aufbauten I und II

Für die Aufbauten I und II ergaben sich dabei Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda^*$  von 100-120  $\mu\text{W/K}$  je nach Gasdruck im Gehäuse und erreichter Temperaturdifferenz. Wegen Schwierigkeiten bei der V-Nut-Fertigung in Sintimid wurden weitere Untersuchungen der Aufbauten nicht durchgeführt.

###### 1.4.1.2 Aufbauten III und IV

Für die in der Tabelle 1 gekennzeichneten Aufbauten ohne Isolierscheiben wurden reproduzierbare Meßergebnisse von  $\lambda^*$  ermittelt. Der Aufbau III wurde in Abhängigkeit des Gehäusegasdrucks vermessen. Die Grundtemperatur betrug dabei 5,8 K. Bei

Prepared by

Title

Distribution

dem Gas handelte es sich um Helium (Kontaktgas). Der Gasdruck  $p_{He}$  wurde aus dem Gasdruck  $p_{Luft}$  am Kryostat abgeleitet und ist daher mit einem größeren Fehler behaftet.

Im Diagramm 1 ist  $\lambda^*(p_{He})$  dargestellt und zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang. Das Umgebungsgas des Aufbaus kann die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda^*$  des Aufbaus somit stark verfälschen und ist nicht zu vernachlässigen. Beim Enddruck von  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar (Meßgerät M1) an der Vakuumpumpe liegt der Gasdruck bei Meßgerät M2 und damit vermutlich im Gehäuse bei  $p_{He} = 2,6 \cdot 10^{-5}$  mbar. Die folgenden Tests wurden bei diesem Druck durchgeführt.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda^*$  der Aufbauten III und IV von der Starttemperatur  $T_1$  bzw. von der Gehäuse-Grundtemperatur  $T_0$  wurde als nächstes bestimmt.

Diagramm 2 zeigt die Meßergebnisse für beide Aufbauten. Es ist  $\lambda^*$  über  $T_1$  aufgetragen. Zum Vergleich ist aus der Literatur [1] die Steigung der Materialkennlinie  $\lambda(T)$  von Vespel SP1 (Kugelmateriale im Aufbau) eingetragen. Im Rahmen der erzielten Meßgenauigkeit ist die Übereinstimmung der Steigungen im Temperaturbereich von 4-15 K sehr gut. Da die geometrischen Abmessungen der wärmeleitenden Wege im Aufbau unbekannt sind, ist ein Vergleich absoluter Werte im Diagramm nicht möglich.

Prepared by

Title

Distribution

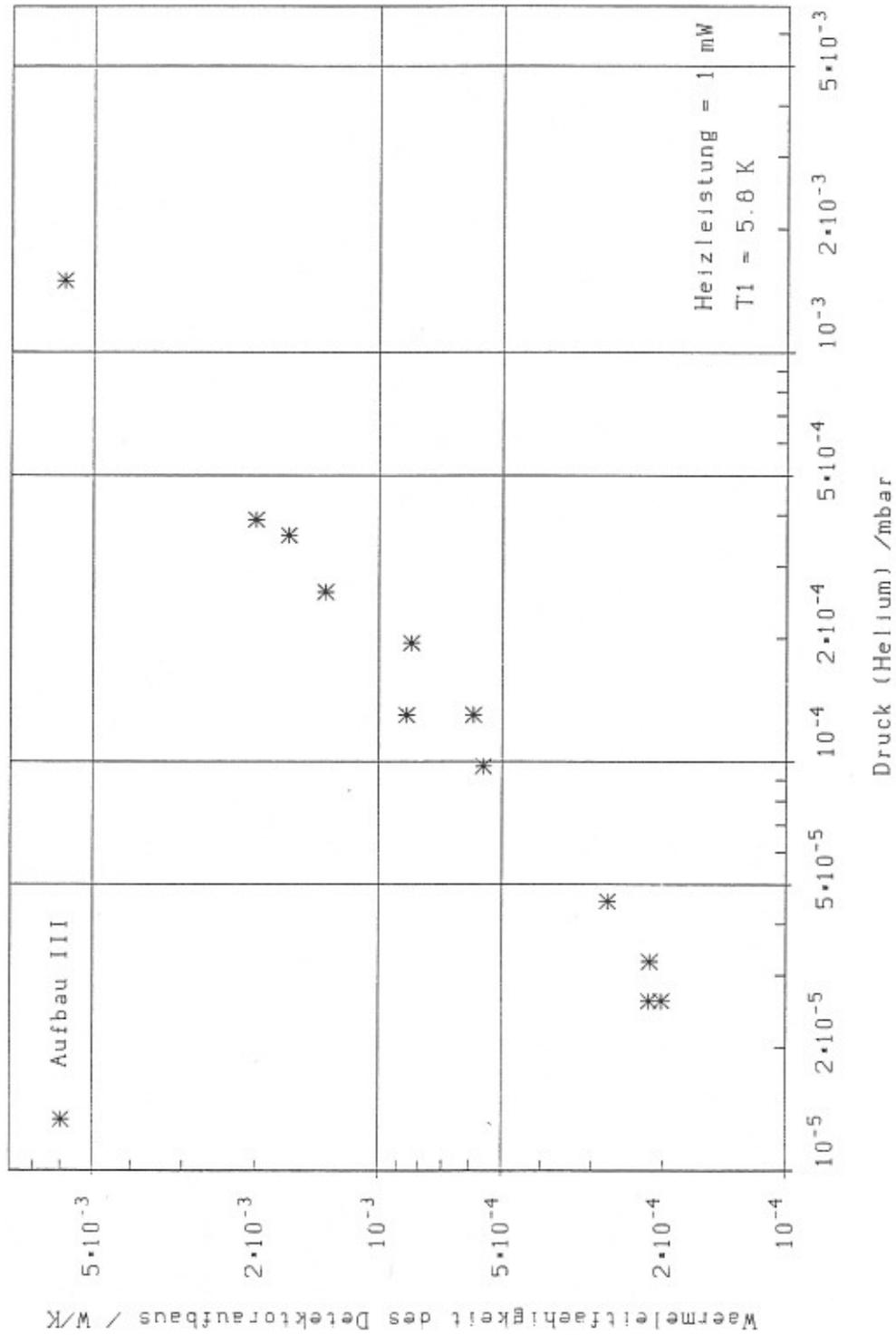


Diagramm 1

Prepared by

Title

Distribution

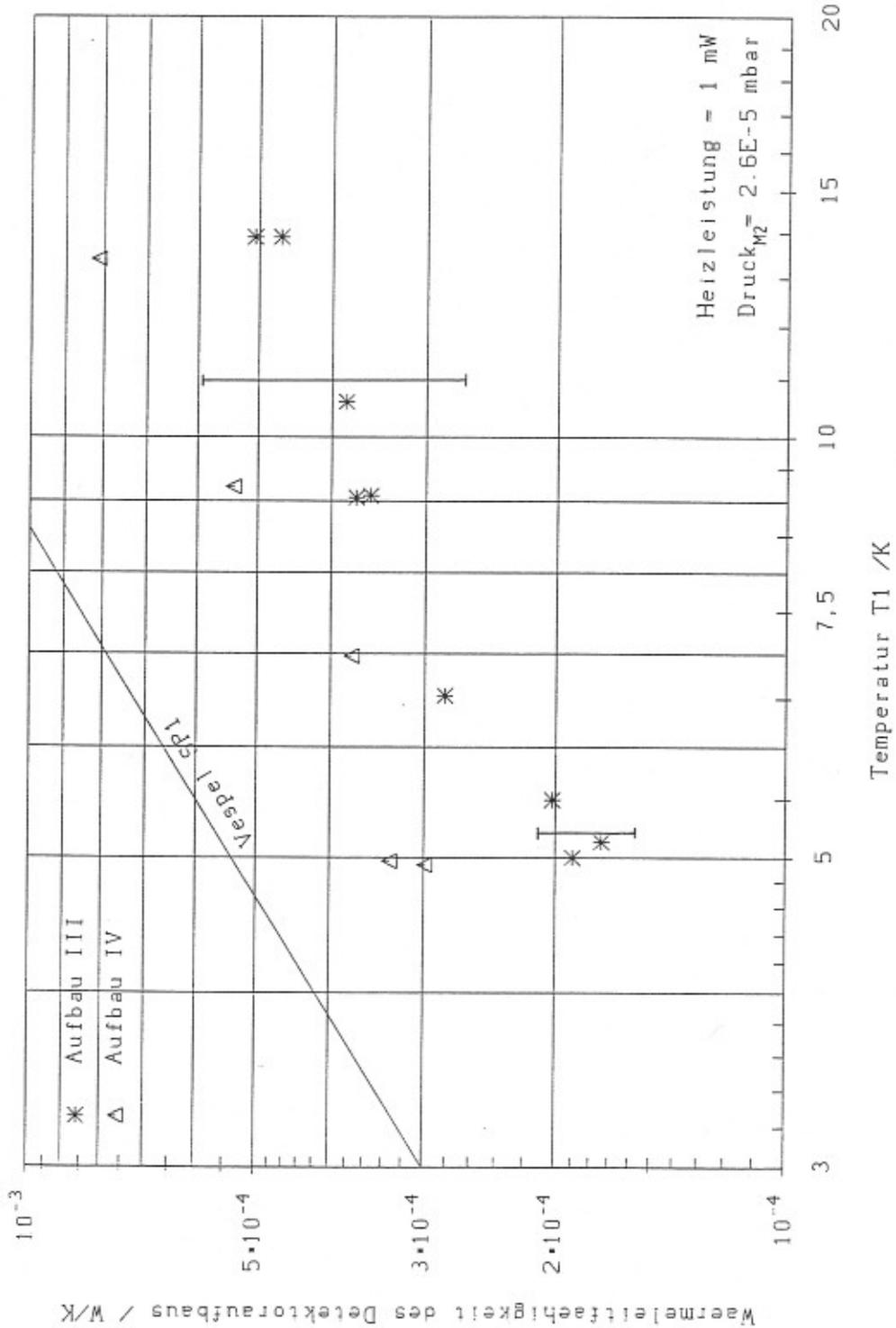


Diagramm 2

Prepared by

Title

Distribution

### 1.4.2 Auswertung in 2. Näherung

#### 1.4.2.1 Aufbauten III und IV

Ausgehend von der Tatsache, daß die eingestellte Heizleistung  $P_{Heiz}$  dem Wärmeleitintegral zwischen der Start- und Endtemperatur  $(T_1, T_2)$  entspricht:

$$\int_{T_1}^{T_2} \lambda \cdot dT = P_{Heiz} ,$$

wurde in Diagramm 3 und 4 für die Aufbauten III und IV  $P_{Heiz}(T)$  dargestellt. Dabei wurde beginnend mit dem Datenpaar bei niedrigster Temperatur  $T_{min}$  (etwa 5 K) für jedes weitere Datenpaar die zu erwartende Heizleistung zwischen  $T_{min}$  und dem gemessenen Endwert  $T_2$  des jeweiligen Datenpaares sukzessive bestimmt. Die dünnen Hilfslinien wurden zur Interpolation des Wärmebeitrages zwischen 5 K und  $T_1$  jedes Meßpaares verwendet.

In 2. Näherung ergab sich die durchgezogene Linie, als verwendbare Kennlinie des Wärmeleitintegrals der Aufbauten.

Prepared by

Title

Distribution

Mit den gegebenen Temperaturen am Aufbau während der Mission, läßt sich mit den Diagrammen 3 und 4 die zugehörige Wärmelast bestimmen und Wärmefluß-Ersatzschaltbilder angeben (Abb. 3).

Für die langwelligen Detektoren darf die Drahtbrücke keinen nennenswerten thermischen Widerstand darstellen. Die Ankopplung muß über eine gute Kupferverbindung erfolgen.

Für die Ankopplung der Detektorblöcke der kurzwelligen Spektrometer an die Kältebrücken in der CRISTA-Optik soll Kupferlitze verwendet werden. Das Wärmeleitintegral des Kupfers ändert sich zwischen Anfang und Ende der Mission um etwa den Faktor 1,2 [2]. Damit muß nach Abb. 3 über die Kupferlitze die Wärme von 2,2 - 1,8 mW am Anfang - Ende der Mission (Aufbau IV: 3 - 2,5 mW) zum Detektortank abfließen. Über die Zahl und die Geometrie der Litzendrähte kann die Ankopplung angepaßt werden.

Zudem ist eine Heizeinrichtung mit Regelung am Detektorblock zu installieren, die eine variable Heizleistung von mindestens 1,8 mW zur Temperaturstabilisierung liefert.

Prepared by

Title

Distribution

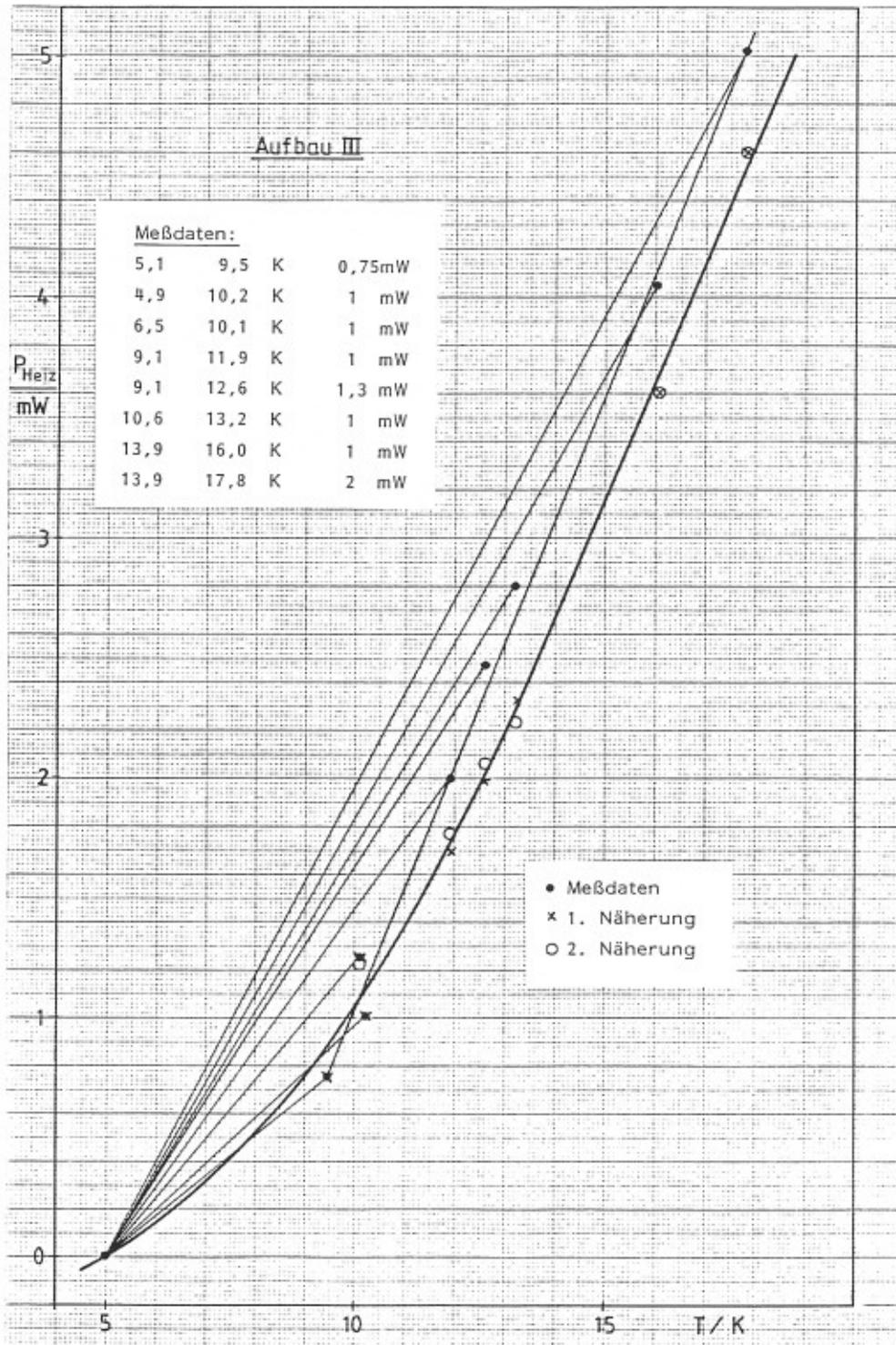


Diagramm 3

Prepared by

Title

Distribution

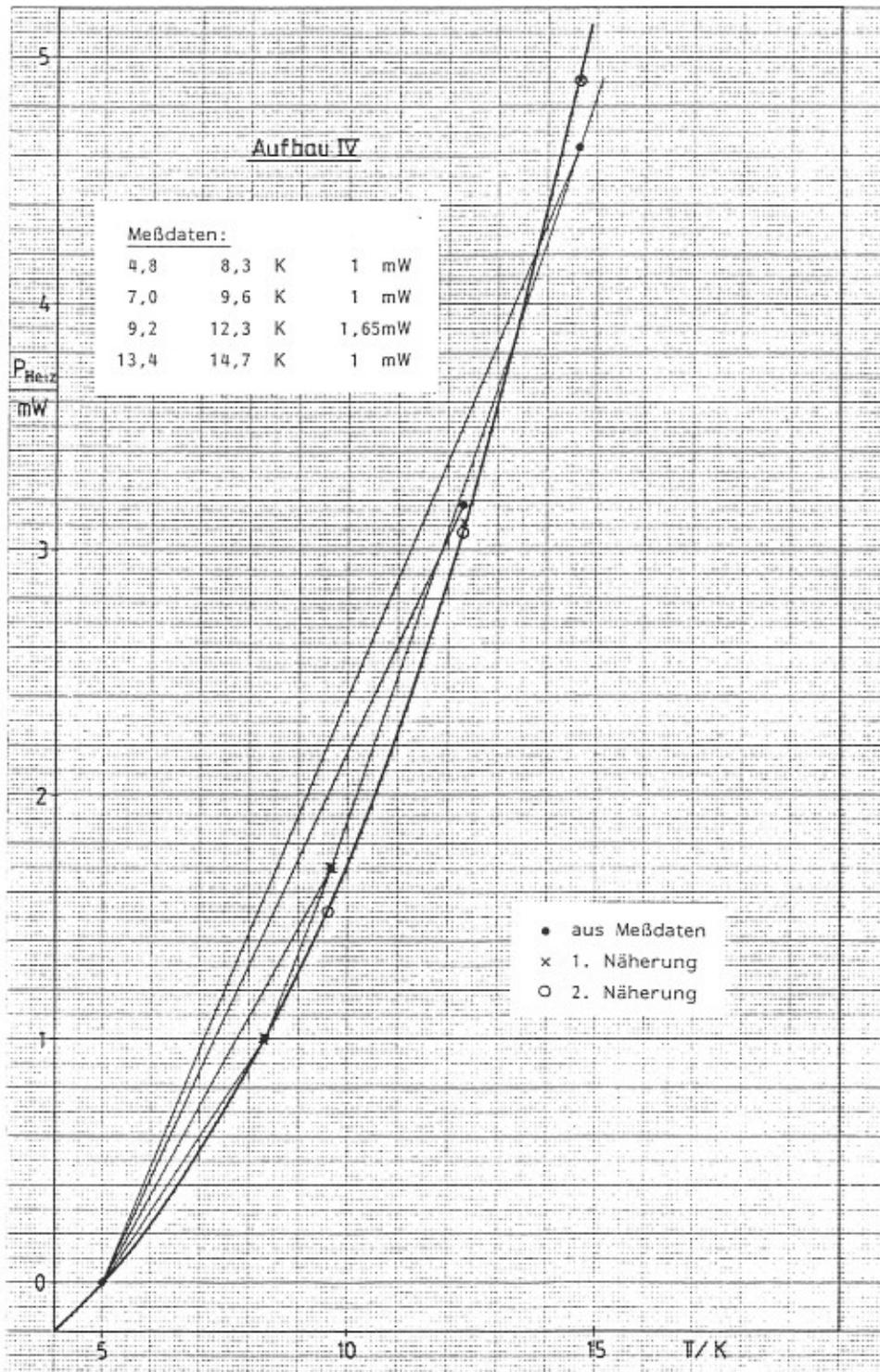


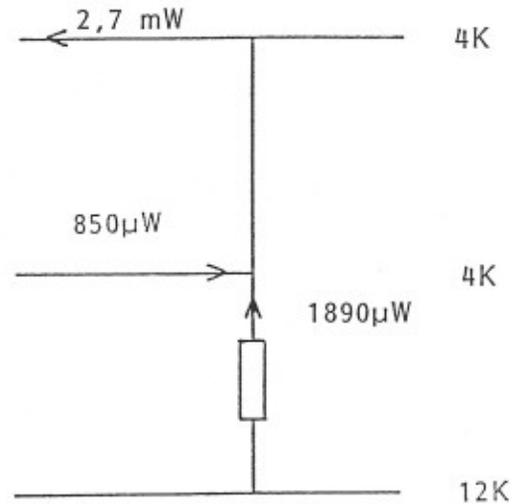
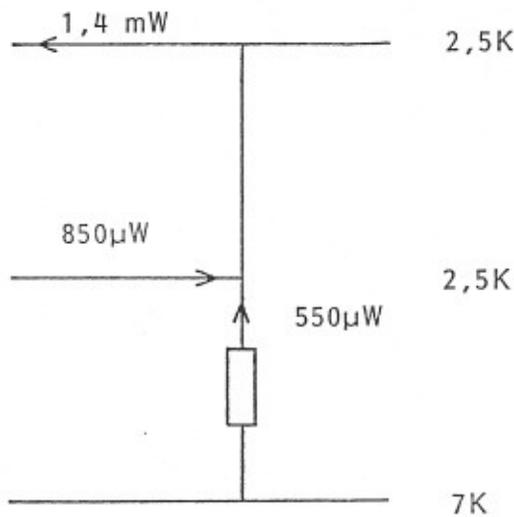
Diagramm 4

Prepared by

Title

Distribution

Anfang - langwelliges Spektrometer - Ende



Anfang - kurzwelliges Spektrometer - Ende

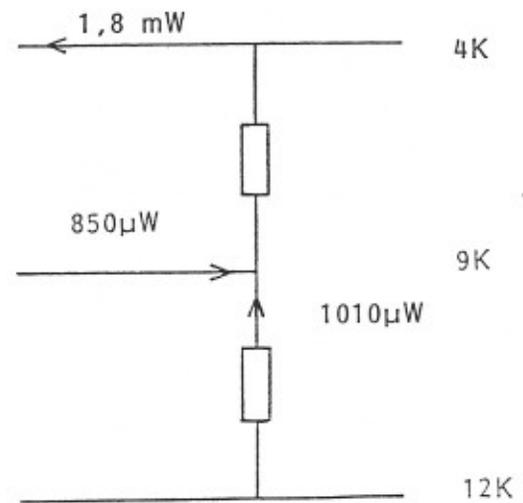
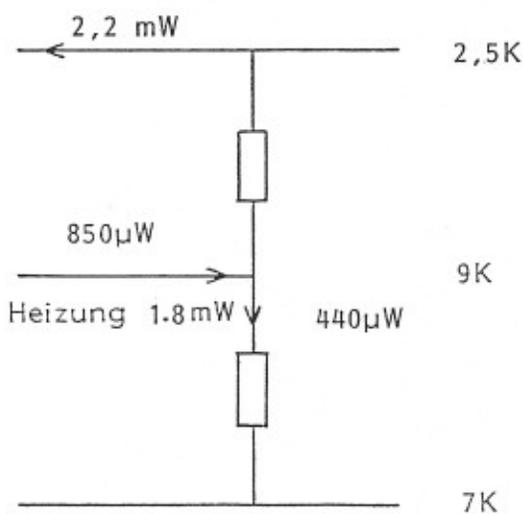


Abb. 3: Wärmefluß-Ersatzschaltbilder Aufbau III, 2. Näherung

Prepared by

Title

Distribution

Die Gesamtwärmelast auf den Detektorblock ergibt sich in 2. Näherung zu 8,0 mW bzw. 8,1 mW am Anfang bzw. Ende der Mission (Aufbau IV: 10,8 mW bzw. 11,4 mW) und ist damit etwa konstant. Bei einer Zeitaufteilung von 80% Anfangsphase und 20% Endphase ergibt sich eine mittlere effektive Belastung von 8,0 mW. Aufbau IV liefert dabei 10,9 mW und erfüllt die thermischen Anforderungen nicht.

### 1.5 Fehlerabschätzung

Im Diagramm 2 sind Fehlerbalken (max. Meßfehler) eingezeichnet. Die Meßfehler für die gemessene Wärmeleitfähigkeit  $\lambda^*$  beträgt etwa 15-30 % je nach Temperatur der Spaltplatte. Durch die Reduzierung der Meßleitungen zu den Widerständen (4 auf 2 Leitungen) erhöhte sich der Fehler von  $\lambda^*$  um ca. 5-10 %. Die größeren Meßfehler im oberen Temperaturbereich sind auf die ungenaue Temperaturmessung mit den Kohleschichtwiderständen zurückzuführen.

Mit den Meßfehlern kann abschließend die Schwankungsbreite der ermittelten Wärmelast auf den Detektortank angegeben werden. Sie beträgt etwa 5-12 % am Anfang-Ende der Mission. Für die Berechnungen in 2. Näherung liegt der Fehler vermutlich in der unteren Hälfte des Fehlerbereichs.

Prepared by

Title

Distribution

## 2. Detektorblockankopplung an Kältebrücke

Die Detektorblöcke sollen zur Kühlung mit dem Detektortank verbunden werden. Dazu werden zwei massive Kältebrücken aus Kupfer in der CRISTA-Optik installiert, die vom Detektortank bis in die Nähe der Detektorblöcke reichen.

Die Verbindung jedes Detektorblocks mit einer Kältebrücke soll durch eine Drahtbrücke mit definiertem Wärmeleitwert erfolgen.

### 2.1 Dimensionierung der Drahtbrücken

In Kap. 1 sind die geforderten Wärmeleitwerte für die Drahtbrücken angegeben. Für die Detektoren (langwellig) mit möglichst geringer Betriebstemperatur (2.5-4 K), darf die Drahtbrücke keinen nennenswerten thermischen Widerstand darstellen. Die Ankopplung muß über eine gute Kupferverbindung (z.B. Kupferfolie, einige cm breit) erfolgen.

Die Detektoren der kurzwelligen Spektrometer sollen durch eine Regeleinrichtung auf 9 K stabilisiert werden. Der Wärmeinput jedes Detektorblocks in den Detektortank über die Drahtbrücke beträgt dabei 2,2 mW bzw. 1,8 mW bei einer Temperatur von 2,5 K bzw. 4 K der Kältebrücke.

Prepared by

Title

Distribution

Als Material für die Drahtbrücken wurde Kupferdraht 0,1 mm blankweich nach DIN 46431 / DIN 40500 (Elektrolyt-Kupferdraht, 99,95%, unlackiert) verwendet. Nach [2] ist dafür das Wärmeleitintegral

$\int_{5,5 \text{ K}}^{9 \text{ K}} \lambda dT \sim 20 \text{ W/cm}$ . Damit sind für den erforderlichen Wärmefluß von 1,8 mW für die Drahtbrücke rechnerisch etwa 17 parallele Cu-Drähte mit einer Länge von 15 cm anzubringen.

## 2.2 Tests und Ergebnisse

Die Drahtbrücken bestanden aus den Kupferdrähten, die an den Enden auf ein Kupferblech (15\*10\*1 mm, fein geschlichtet) gelötet wurden. Die Drahte lagen dabei 5 mm auf dem Blech auf.

Für die experimentelle Überprüfung des Wärmeleitwerts der Drahtbrücken wurde der Detektoraufbau (Kap. 1) verwendet. Die Drahtbrücke wurde dazu auf der Spaltplatte und dem Gehäuseboden angeschraubt (M4-Schraube, Drehmoment 3,2 Nm, ohne Indium).

Im Test wurde mit einer Drahtbrücke aus 10 Drähten - bei konstanter Heizleistung von 2,6 mW - eine Temperaturerhöhung der Spaltplatte von 5,45 K auf 8,94 K erreicht. Der Wärmefluß des Aufbaus ohne Drahtbrücke lag bei den gleichen Temperaturen bei 670  $\mu\text{W}$ .

Für die Drahtbrücke ergibt sich damit ein Wärmefluß von 1,93 mW.

Prepared by

Title

Distribution

In Abb. 4 ist für verschiedene Kupfersorten die Wärmeleitfähigkeit über der Temperatur aufgetragen. Im Temperaturbereich von 2,5-9 K kann die Wärmeleitfähigkeit in der Abbildung als linear angenommen werden.

Mit dem Meßwert des Wärmeflusses der Drahtbrücke zwischen 5 und 9 K konnte damit der zu erwartende Wärmefluß über die Drahtbrücke zwischen 2,5 und 9 K sowie zwischen 4 und 9 K berechnet werden. Der Wärmefluß beträgt 2,5 und 2,9 mW. Die Wärmeflüsse werden mit Hilfe der Steigungen der Kurvenscharen aus Abb. 4 zwischen 2,5-9 K und dem Meßwert berechnet. Die logarithmische Achsenteilung wurde dabei berücksichtigt.

Bei Verwendung der getesteten Drahtbrücke aus 10 Kupferdrähten erhöht sich die mittlere effektive Wärmelast auf den Detektor-tank auf genau 10,0 mW. Die Zusatzheizung für die Regelung ist auf mindestens 2,5 mW auszulegen. Wie die Berechnungen zeigen, sind auch 7-8 Kupferdrähte ausreichend. Der Gesamtwärmefluß wird etwa 8 mW betragen - genaue Wärmeflußdaten sind jedoch nicht anzugeben.

Zur elektrischen Isolation der Detektorblöcke kann bei der Ankopplung der Drahtbrücken ein Saphir-Plättchen untergelegt werden (auf der 9 K-Seite). Bei guten elektrischen Isolations-eigenschaften im Kalten liegt die Wärmeleitfähigkeit in der Größenordnung von Kupfer (vergleiche Abb. 5 [2]).

Prepared by

Title

Distribution

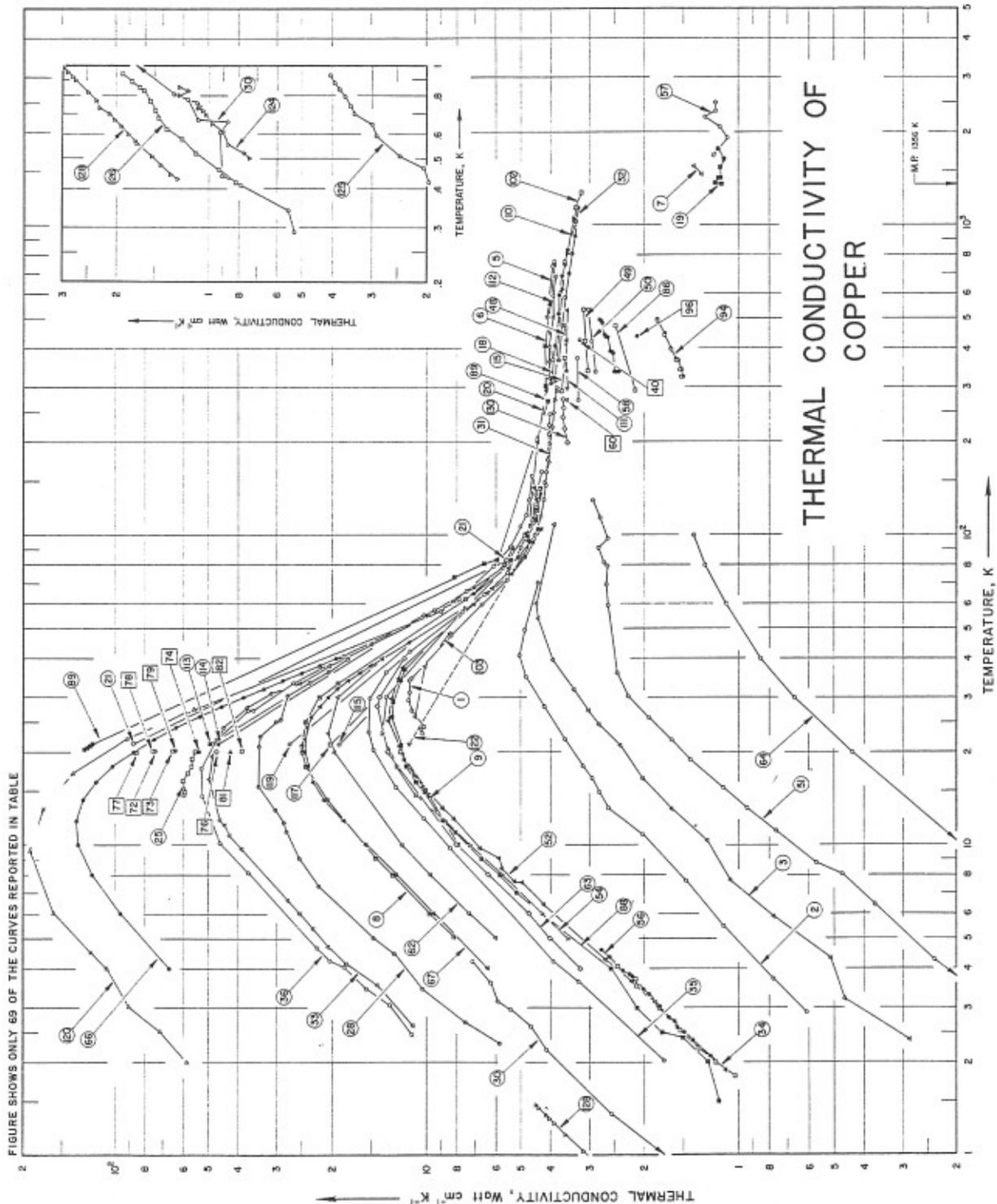


Abb. 4: Wärmeleitfähigkeit von Kupfer [2]

Prepared by

Title

Distribution

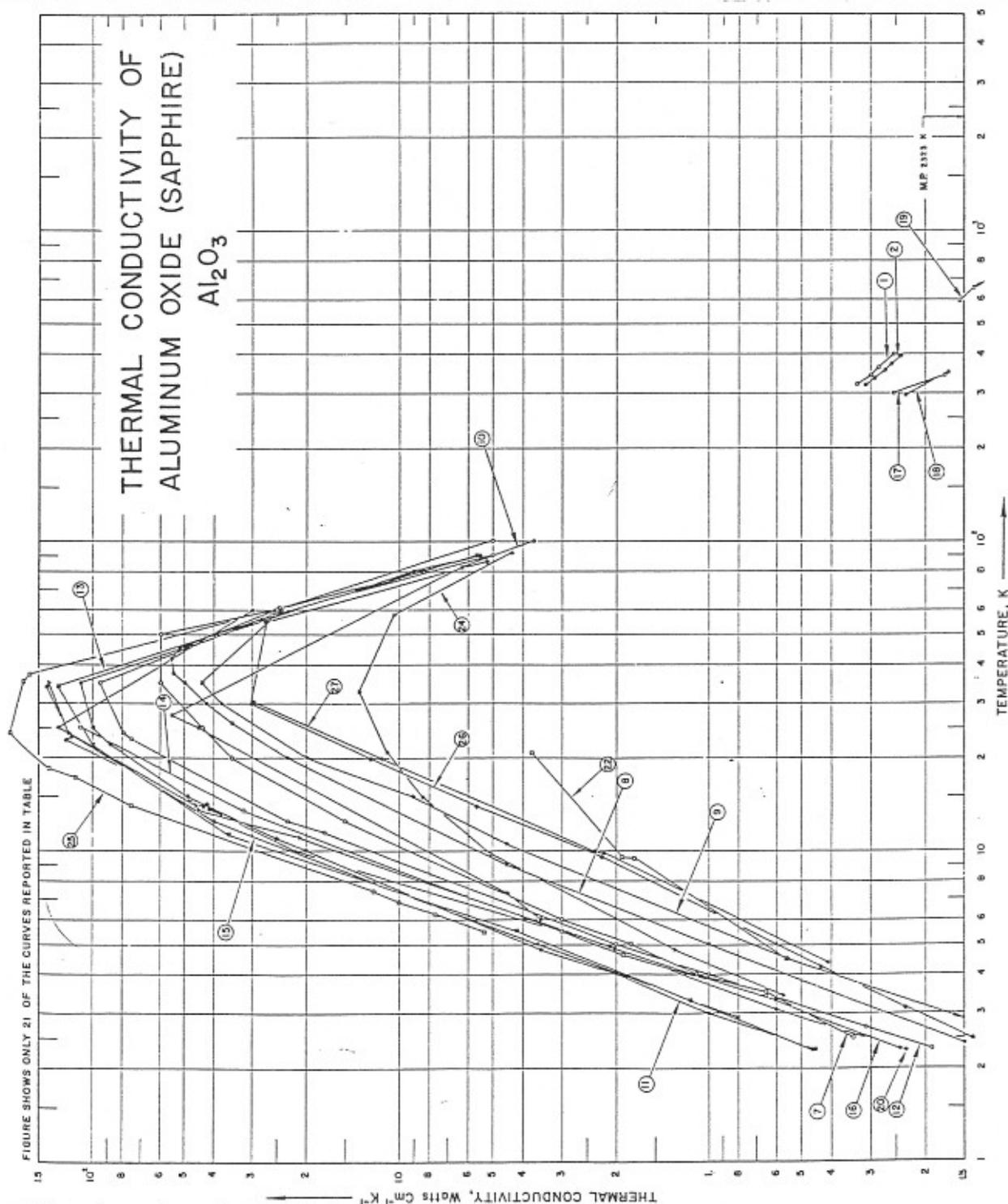


Abb. 5: Wärmeleitfähigkeit von Saphir [2]

Prepared by

Title

Distribution

### 3. Temperaturstabilisierung der Detektoren

Für den optimalen Betrieb der Detektoren der kurzwelligen Spektrometer, sind diese auf einer konstanten Temperatur zu halten.

Als Grundlage für die Entwicklung der Regeleinrichtung diente der in Kap. 1 beschriebene mechanische Aufbau der Detektoreinheiten. Für die Tests der Regeleinrichtung wurde auf der Spaltplatte eine Kupfermasse (1 kg) installiert, um den Einfluß der realen Masse der Detektorblöcke auf die Reglereigenschaften zu bestimmen.

#### 3.1 Anforderungen an die Temperaturregelung

Die geforderte Temperatur der Detektoren der langwelligen Spektrometer liegt bei etwa 9 K. Die Schwankungsbreite der Isttemperatur soll dabei 0,02 K nicht überschreiten. Die Abweichung zwischen eingestelltem Sollwert und dem Istwert ist dabei unerheblich, da die Detektoristtemperatur experimentell eingestellt wird.

Regelungstechnisch ist zu beachten, daß keine großen Überschwinger beim Anfahren an den Sollwert und keine periodischen Regelschwingungen mit steilen Schaltflanken (Zweipunktregelung) auftreten. Regelabweichungen sollen in wenigen Minuten ausgeregelt werden.

Prepared by

Title

Distribution

### 3.2 Der Detektorblock aus regelungstechnischer Sicht

Aus der Sprungantwort lassen sich die Detektorblöcke als Regelstrecke regelungstechnisch einordnen. Da sich die Detektor-temperatur nach dem Einschalten der Heizung sofort erhöht und sich mit der Zeit exponentiell an den neuen Gleichgewichtszustand annähert, handelt es sich um eine Regelstrecke 1. Ordnung.

Sie läßt sich beschreiben mit

$$\tau_s \cdot \dot{T} + T - T_0 = P / \lambda^*$$

und die Lösung mit  $P = P_0$  (konstante Heizleistung)

$$T = T_0 + P_0 / \lambda^* \cdot (1 - \exp(-t/\tau_s)) \quad \text{mit } \tau_s = m \cdot c / \lambda^*$$

(m: Masse und c: spez. Wärmekapazität der Spaltplatte).

Bei den untersuchten Detektoraufbauten ist  $\tau_s \sim 30$  min und  $\lambda^* = 140 \mu\text{W/K} - 340 \mu\text{W/K}$  je nach Temperaturdifferenz und Heizleistung. Die Totzeit  $\tau_t$  zu Beginn der Sprungantwort beträgt nur einige Sekunden. Regelstrecken, die das Kriterium  $\tau_s / \tau_t > 10$  erfüllen, sind "gut regelbar".

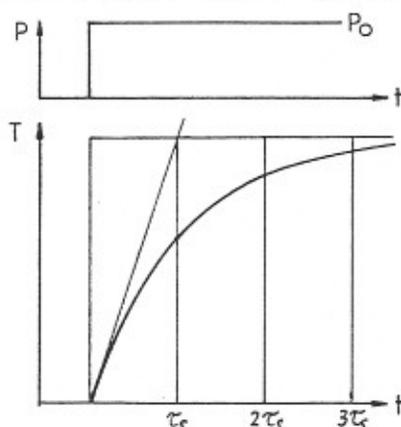


Abb. 6: Prinzipielle Sprungantwort

Prepared by

Title

Distribution

### 3.3 Regelschaltung und Versuchsaufbau

Zur Ausregelung auftretender Temperaturschwankungen des Detektorblocks wird die Heizleistung über einen Regler gesteuert. Als Regler läßt sich sowohl ein P-Regler als auch ein PI-Regler einsetzen, die mit der Regelstrecke 1. Ordnung kein schwingungsfähiges System bilden.

Die folgende Schaltung in Abb. 7 wurde aufgebaut und getestet. ICl bildet den Vergleich zwischen eingestelltem Sollwert und Temperatur-Istwert bei einer Verstärkung von 10. Der Sollwert wird dabei aus der Referenzspannung des IC3 abgeleitet und der Istwert wird von einer separaten Temperaturmeßplatine geliefert. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem 1000 Ohm-Kohleschicht-Widerstand, die temperaturabhängige Widerstandsänderung wird dabei in eine temperaturabhängige Spannung umgesetzt. Bei den Experimenten war der Zusammenhang:

$R_T$ (kOhm)	$U_A$ (V)	$T$ (K)
1,813	0,983	46,754
7,503	4,145	9,361
22,120	12,179	5,081

Im Bereich von 9 K war die Empfindlichkeit der Temperaturmeßplatine  $\Delta U_A / \Delta T = -0,63 \text{ V/K}$ .

Prepared by

Title

Distribution

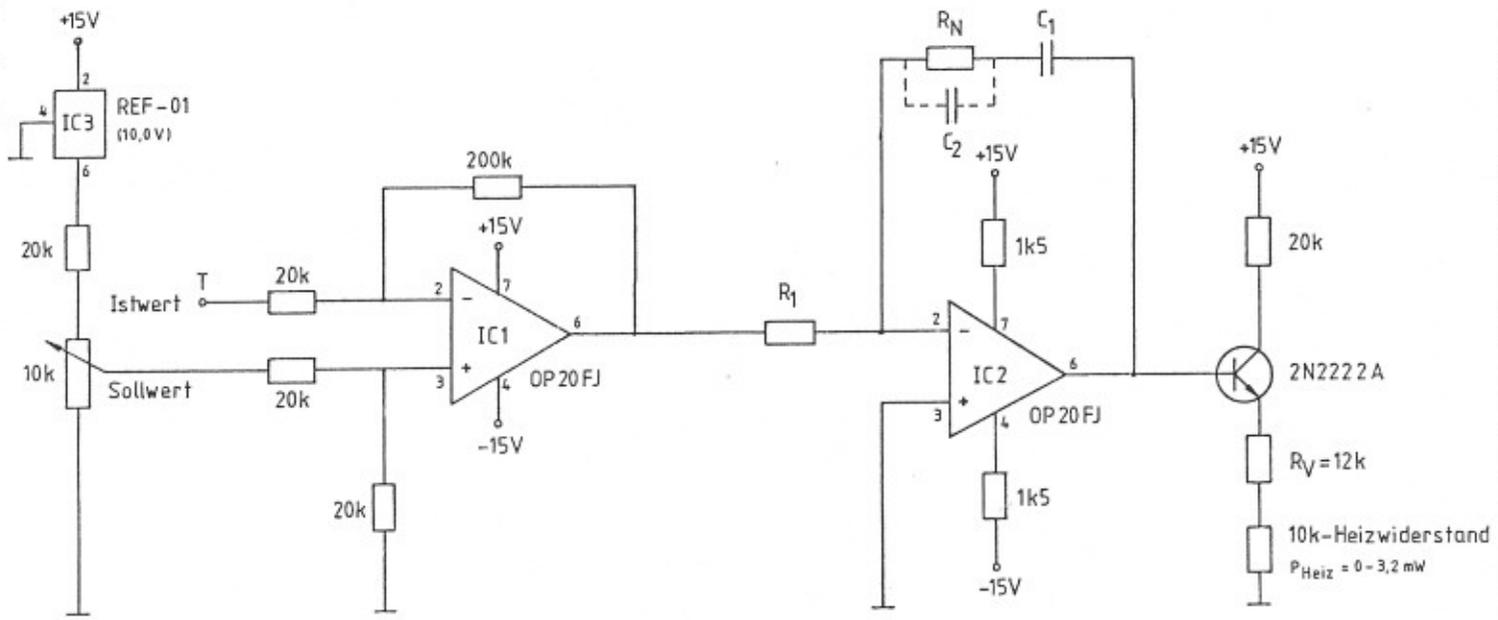


Abb. 7: Regelschaltung

Prepared by

Title

Distribution

IC2 bildet den Regler. Je nach Beschaltung mit  $R_1$ ,  $R_N$  und  $C_1$  läßt sich ein P-Regler oder PI-Regler realisieren. Der Ausgang von IC2 steuert dabei über den Transistor den Heizstrom. Mit  $R_v$  ist der maximale Strom durch den Heizwiderstand einstellbar.

### 3.4 Experimente und Ergebnisse

Für die Tests der Regeleinrichtung wurde der Detektoraufbau nach Kap. 2 (mit Drahtbrücke zwischen Spaltplatte und Gehäuseboden) verwendet. Zusätzlich wurde auf der Spaltplatte eine Kupfermasse von 1 kg angeschraubt, um die reale Masse der Detektoreinheiten zu simulieren und damit den Einfluß erhöhter Wärmekapazität auf die Reglereigenschaften abzuschätzen. Für den Temperatursensor auf der Spaltplatte wurde für die Umsetzung mit der Temperaturmeßplatine ein 1000 Ohm-Widerstand eingesetzt.

Zur Verifizierung der Funktionsfähigkeit der Regelschaltung mit dem Detektoraufbau wurden verschiedene Werte für  $R_1$ ,  $R_N$  und  $C_1$  eingesetzt. Bei Änderung des Sollwertes oder der Bodentemperatur des Kryostatbodens wurde die Isttemperatur aufgezeichnet.

Für die vorliegende Regelstrecke (1. Ordnung, ohne Totzeit) kann die Regler-Verstärkung theoretisch beliebig hoch sein - der Regel-

Prepared by

Title

Distribution

kreis kann nicht instabil werden. Für die Tests wurde zunächst ein reiner P-Regler mit der Verstärkung  $V_P = 1500$  ( $R_N = 150 \text{ kOhm}$ ,  $R_I = 1 \text{ kOhm}$ ) realisiert.

Bei konstanter Bodentemperatur wurde jede Änderung des Sollwertes in kurzer Zeit ausgeregelt. Die Temperaturschwankungsbreite betrug  $< 0,02 \text{ K}$ . Störungen infolge schwankender Bodentemperatur wurden vom P-Regler jedoch nicht vollständig ausgeregelt.

Der Wärmeleitwert des Detektoraufbaus ist stark von der Temperaturdifferenz der Spaltplatte und des Bodens abhängig, d.h. die Charakteristik der Regelstrecke (Detektoraufbau) ändert sich mit Variation der Bodentemperatur. Für den P-Regler verschiebt sich dadurch der Arbeitspunkt und daraus folgt eine bleibende Regelabweichung zwischen Soll- und Istwert. Bei den Experimenten betrug die Abweichung ca.  $0,03 \text{ K}$  bei einer Bodentemperaturerwärmung um  $1,2 \text{ K}$ .

Der Effekt kann durch Erhöhung der Verstärkung  $V_P$  verringert werden, jedoch ist eine vollständige Beseitigung unmöglich. Der PI-Regler zeigt diese Erscheinung nicht. Durch den I-Anteil ist jede Störung ohne bleibende Regelabweichung ausregelbar.

Für Regelstrecken mit Verzögerung 1. Ordnung und Totzeit ist eine Bestimmung geeigneter Werte für  $R_I$ ,  $R_N$  und  $C_I$  bei unbekannter

Prepared by

Title

Distribution

Regelstrecke nach dem in der Literatur [3] beschriebenen Verfahren von Ziegler und Nichols möglich - und daher besonders geeignet bei der Kalibrierung der Detektortemperatur beim CRISTA-Testlauf.

Zunächst wird der Regler als reiner P-Regler betrieben ( $C_1 = 0$ ) und  $R_1$  und  $R_N$  durch Potentiometer ersetzt. Verändert man die Verstärkung  $V_P = R_N/R_1 \cdot 10$  (10 von IC1) zu größeren Werten, so setzt bei einer bestimmten Verstärkung  $V_0$  gerade periodische Regelschwingung mit der Periodendauer  $T_0$  ein. Hierbei schaltet der Regler zwischen minimalem und maximalem Heizstrom hin und her (Zweipunktregler). Die optimale Reglereinstellung für einen PI-Regler ist daraus:

$$V_P = 0,45 \cdot V_0$$

$$\tau_{C_1} = 1/R_N/C_1 = 0,83 \cdot T_0$$

Im Experiment wurde nach diesem Verfahren  $V_0 \sim 5000$  und  $T_0 \sim 3,6$  s bestimmt und für die Beschaltung von IC2 die Werte

$$R_N = 300 \text{ kOhm}, R_1 = 1,5 \text{ kOhm}, C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$$

in die Schaltung eingesetzt.

Die Reglereigenschaften der so dimensionierten Schaltung sind sehr gut. Die Anforderungen wurden erfüllt. Die Temperaturschwankungsbreite betrug  $< 5$  mK bei Ausregelzeiten für aufgebraachte Störungen von 30 s. Unterschiede der Reglereigenschaften bei unterschiedlichen Störungsquellen konnten nicht beobachtet werden. Überschwinger beim Anfahren an den Sollwert nach einer Störung waren immer  $< 0,02$  K (vergleiche Abb. 8).

Prepared by

Title

Distribution

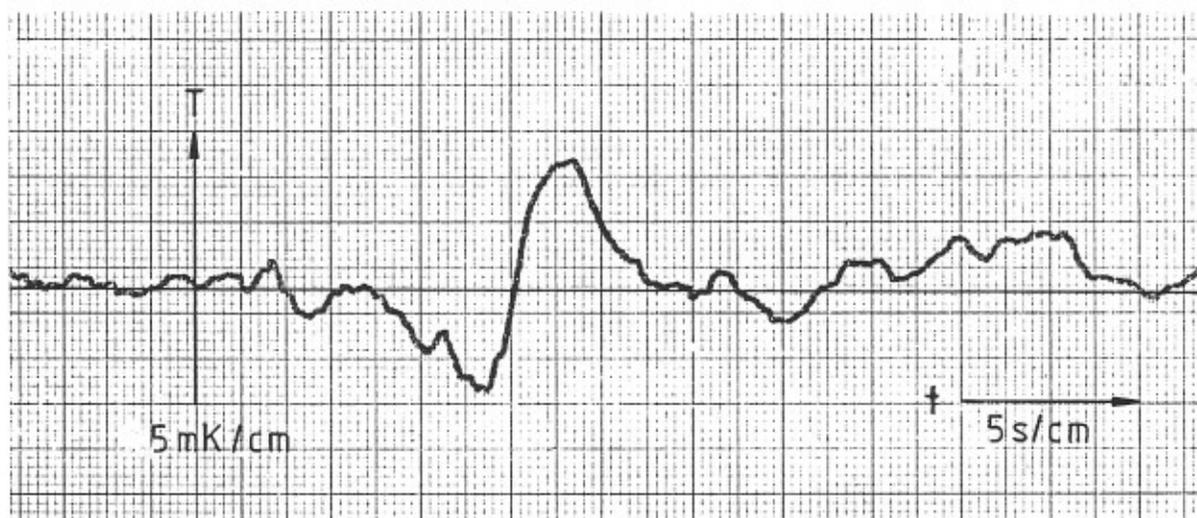


Abb. 8: Temperaturregelung nach Störung (exp. aufgezeichnet)

Zur experimentellen Untersuchung möglicher Temperaturdrift der elektronischen Bauteile der Meß- und Regelplatine, wurden diese in einem Metallgehäuse untergebracht. Das Gehäuse wurde von außen mit einem Heißluftgebläse gleichmäßig erhitzt, bis eine Innentemperaturerhöhung von 22 °C auf ca. 50 °C erreicht war. Mit einem zusätzlichen Temperatursensor am Kupferblock, der unabhängig von der Regelplatine ausgelesen werden konnte, wurde die Blocktemperatur mit der Isttemperatur am Reglereingang verglichen.

Der beobachtete Temperaturdrift des Kupferblocks betrug bis zu + 0,01 K. Bei Verwendung von Operationsverstärkern mit geringerer Temperaturdrift, läßt sich der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Detektortemperatur noch vermindern.

Prepared by

Title

Distribution

Durch die Installierung der realen Kupfermasse auf der Spaltplatte wurde die Regelstecke beeinflusst.  $\tau_s$  erhöhte sich um den Faktor 2. Negative Auswirkungen der erhöhten Masse auf die Eigenschaften des Reglers konnten nicht festgestellt werden.

Damit die korrekte Funktion der rückgekoppelten Operations-Verstärker gewährleistet ist, darf die Verstärkung durch die externe Beschaltung der OP-Bausteine nicht zu hoch gewählt werden. Es ist möglich einen Teil der erforderlichen Verstärkung von IC2 auf IC1 zu übertragen und die Verstärkung größer als 10 auszulegen. Auch die Empfindlichkeit der Temperaturmeßplatine kann dazu verändert werden.

Prepared by

Title

Distribution

#### 4. Rütteltest des Detektoraufbaus

Der Detektoraufbau III wurde zum Nachweis der Funktionsfähigkeit einem Rütteltest unterzogen. Der Test wurde dabei mit und ohne Zusatzmasse (1 kg) bei Anregungsschwingungen (Sinus) von 1 Hz - 2 kHz bei Raumtemperatur durchgeführt.

Für den Detektoraufbau mit realer Masse traten bei folgenden Anregungsschwingungen Eigenfrequenzen auf:

526 Hz, 735 Hz, 847 Hz.

Der Aufbau unterlag dabei maximal der 25fachen Erdbeschleunigung (5-10fache Überhöhung). Zur Erkennung möglicher Beschädigungen am Aufbau, wurden die Einzelteile - besonders die Vespelkugeln - demontiert und visuell (Lupe) untersucht. Defekte am Aufbau konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Die Testergebnisse ohne Zusatzmasse waren ähnlich. Eigenschwingungen traten jedoch erst ab 400 Hz auf. Der Aufbau wurde maximal mit 65·g gelastet.

Prepared by

Title

Distribution

### 5. Zusammenfassung

Zur Befestigung der Detektoren des CRISTA-Experimentes auf der Spektrometer-Deckplatte wurde ein Aufbau entwickelt und getestet, der die geforderten thermischen Isolationseigenschaften und die mechanischen Stabilitätskriterien erfüllt.

Die Ankopplung der Detektorblöcke der kurzwelligen Spektrometer an die Kältebrücken in der CRISTA-Optik kann mit einer Kupferlitze aus 7-8 Drähten erfolgen. Die Litze wurde dabei so abgestimmt, daß mit minimaler Heizleistung die Detektortemperatur auf  $9 \text{ K} \pm 5 \text{ mK}$  durch eine Regeleinrichtung (PI-Regler) stabilisiert werden kann.

Das verwendete Verfahren zur optimalen Dimensionierung des Reglers nach Ziegler und Nichols kann dabei auch bei der Kalibrierung der Detektortemperaturen beim CRISTA-Testlauf benutzt werden.

Der mittlere effektive Gesamtwärmefluß aller Detektorblöcke in den Detektortank beträgt beim Aufbau III etwa 8 mW. Aufbau IV erfüllte die Anforderungen nicht.

Die gemessenen Wärmeleitwerte des Detektoraufbaus sind stark von der jeweiligen Umgebung (Vakuum und Umgebungsstrahlung) des Aufbaus abhängig. Die Übertragbarkeit der Meßwerte bei Verwendung des Detektoraufbaus in der CRISTA-Optik läßt sich daher nicht angeben.

Prepared by

Title

Distribution

Literaturverzeichnis

- [1] M. Locatelli, D. Arnaud, M. Routin  
Thermal conductivity of insulating materials below 1 K  
CRYOGENICS 6/76
- [2] THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER, Volume 1+2
- [3] Mann/Schiffelgen  
Einführung in die Regelungstechnik