

5/72

BMBW-FB W 70-44

BMBW-FB W 70-44

Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft

Forschungsbericht W 70-44

Weltraumforschung

Flächenfotometrie künstlicher Neutralgaswolken

von

D. Hannemann

Bereich Extraterrestrische Physik an der
Ruhr Universität Bochum

Digitalisat: Prof. Dr. D. Hannemann

Juli 1970

Dieses Heft enthält einen Arbeitsbericht über ein vom
Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
gefördertes Vorhaben.

Verantwortlich für den Inhalt dieses Berichtes ist der Autor.

Das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit,
die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben
sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

Als Manuskript gedruckt.

Druck und Verbreitung:

Zentralstelle für Luftfahrtokumentation und -Information (ZLDI)
der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt E. V.

8 München 86, Postfach 880, Telex: 05/22324

Preis: DM 14,95

Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft

Forschungsbericht W 70-44

Weltraumforschung

Flächenfotometrie künstlicher Neutralgaswolken

von

D. Hannemann

**Bereich Extraterrestrische Physik an der
Ruhr Universität Bochum**

71 Seiten mit
52 Abbildungen
13 Tabellen
11 Literaturstellen

Juli 1970

**Dieses Heft enthält einen Arbeitsbericht über ein vom
Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
gefördertes Vorhaben.**

Verantwortlich für den Inhalt dieses Berichtes ist der Autor.

**Das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit,
die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben
sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.**

Als Manuskript gedruckt.

Druck und Verbreitung:

**Zentralstelle für Luftfahrtdokumentation und -information (ZLDI)
der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt E. V.**

8 München 86, Postfach 880, Telex: 05/22324

Preis: DM 14,95

DK 535.24
535.612
546.431
546.42
551.510.536

FLACHENFOTOMETRIE
künstlicher
NEUTRALGASWOLKEN

von

D. Hannemann

Bereich Extraterrestrische Physik an der
Ruhr Universität Bochum

Februar 1970

1. Zusammenfassung

Um den zeitlichen Verlauf der Gesamthelligkeit in ca. 200 km Höhe expandierender künstlicher Strontium- und Bariumwolken registrieren zu können, wurde ein linsenfreies Zweikanalfotometer entwickelt und in Abisko (Nordschweden) anlässlich mehrerer Raketenexperimente erprobt.

Es wird der gesamte Aufbau des Gerätes beschrieben und das Verhalten seiner wichtigsten Bausteine diskutiert. Anschließend folgt ein Bericht über die Erprobung. Bei der Auswertung der gewonnenen Meßergebnisse, ihrer Diskussion und den Fehlerbetrachtungen wird vorwiegend auf den zeitlichen Verlauf der relativen Intensitäten von Strontiumwolken eingegangen.

Auf Grund bekannter und gemessener Daten kann jedoch auch der absolute Strahlungsfluß für Strontiumwolken grob abgeschätzt werden (ca. 10^8 Quanten/s $\approx 10^6$ Rayleigh).

Das Fotometer hat sich auch unter Expeditionsbedingungen gut bewährt. Bei einer Hochspannung von nur 1100V und einer Bestrahlungsstärke von ca. $3 \cdot 10^{11}$ Quanten/m²s wird eine Anzeige von 1cm, oder 1/5 Gesamtausschlag erreicht. Das Signal/Rausch-Verhältnis betrug 10^3 . Durch Erhöhung der Hochspannung auf 2000V und bei maximaler Blendenöffnung läßt sich die Empfindlichkeit noch um einen Faktor 500 steigern. Voraussetzung ist jedoch eine niedrige Betriebstemperatur des Fotomultipliers.

Die Unsicherheiten bei der Messung betragen etwa 8-10% und sind hauptsächlich durch Ungenauigkeiten und Instabilitäten bei der Registrierung bedingt.

Summary

A dual-channel photometer - without lens - was developed to record the time dependent brightness of artificial strontium- and barium-clouds in an altitude of about 200km. The photometer was tested in Abisko (North-Sweden) on the occasion of some rocket experiments.

The design and tests of the photometer and of its components are described. Strontium cloud measurements were preferably evaluated. The quantum flux of the clouds has been estimated to be about 10^8 /s $\approx 10^6$ Rayleigh.

When the photomultiplier (11st.) high voltage is 1100V then the sensitiveness is 1cm on the recorder/ $3 \cdot 10^{11}$ quants/m²s while the signal-to-noise-ratio is 10^3 . It is possible to raise this sensitiveness by the factor 500 when the high voltage is 2000V and the temperature on the photomultiplier is low (about -20°C).

The average uncertainties of measurements are about 8-10%, mainly due to instabilities in the registration.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung	6
3. Aufbau des Fotometers und Labortests	8
3.1. Gesamtaufbau	8
3.2. Lichtsensor	14
3.3. Verstärkung und Registrierung	21
3.4. Eichvorrichtung und Filter	25
3.5. Fotometercharakteristik	28
4. Messungen mit dem Fotometer	32
4.1. Allgemeines	32
4.2. Messungen an Sr-Wolken	34
4.3. Messungen an Ba-Wolken	39
5. Auswertung der Meßergebnisse	42
5.1. Sr-Wolken	42
5.2. Genauigkeit der Sr-Messungen	49
5.3. Ba-Wolken	53
6. Aussagen über den absoluten Strahlungsfluß	57
6.1. Allgemeines	57
6.2. Berechnung für F1	59
6.3. Diskussion der Berechnung und der Relativeichung	61
7. Anhang	65
7.1. Ergänzungen	65
7.2. Abkürzungen	69
7.3. Literatur	71

2. Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt ein Detailproblem innerhalb des vom Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung geförderten Forschungsvorhabens WRK133 in dem geprüft werden soll, ob durch Beobachtung des Expansionsvorganges künstlich erzeugter Metalldampfwolken in der Hochatmosphäre (150-400km Höhe) Rückschlüsse auf die Dichte und Temperatur am Ort der Wolken gezogen werden können.

Zur Erzeugung der Metalldampfwolken werden in der Nutzlastspitze einer Höhenforschungsrakete Behälter mit einer pyrotechnischen Mischung von Strontium bzw. Barium mit CuO untergebracht, welche durch eine Düse in jeweils vorgegebenen Höhen Barium bzw. Strontiumdampf ausblasen. Die Raketen werden während der Abend- bzw. Morgendämmerung abgeschossen, so daß am Erdboden Dunkelheit herrscht, während die künstlichen Wolken noch (bzw. schon) von der Sonne beleuchtet sind. Durch die Sonnenstrahlung werden die Wolken zur Lichtemission angeregt bzw. ionisiert. Die Strontiumwolken senden eine Resonanzstrahlung bei der Wellenlänge 4607\AA aus; eine Ionisation der Strontiumatome ist nicht festzustellen. Demgegenüber werden Bariumwolken ionisiert. Die Resonanzlinie des ionisierten Bariums liegt bei 6142\AA , die der neutralen Bariumatome bei 5535\AA . Während die Ausdehnung der Strontiumwolken unabhängig vom Magnetfeld der Erde erfolgt, reagiert die ionisierte Komponente der Bariumwolken auf elektrische und magnetische Felder. Daher eignen sich Bariumwolken zum Nachweis von Feldern in der Ionosphäre (Vgl. {8}), während zum Studium der Wechselwirkung mit der Neutralatmosphäre die nicht ionisierten Strontiumwolken geeignet sind.

Die Beobachtung erfolgte vom Erdboden aus durch optische Geräte (Kameras, Fotometer, Spektrographen).

Die Aufgabe des Verfassers bestand darin, ein Fotometer zu entwickeln und zu erproben, mit welchem der zeitliche Verlauf der Gesamthelligkeit der Wolken in zwei Spektralbereichen gleichzeitig erfaßt werden kann. Da Bariumwolken als Verun-

reinigung stets auch Strontium enthalten, erfolgte die Fotometrie im Lichte der Linien von neutralem Barium und Strontium.

Nach der Erprobung im Labor wurde das Fotometer im März 1969 auf der Bodenstation Abisko (Nordschweden) an 4 aufeinanderfolgenden Abenden anlässlich des Abschusses von Höhenforschungsraketen (ESRange Kiruna) eingesetzt, welche Metalldampf Wolken in der Hochatmosphäre erzeugten. Die erste und dritte Rakete trug eine Nutzlast des Max-Planck-Institutes für Extraterrestrische Physik Garching und erzeugte jeweils 3 Bariumwolken. Die zweite Rakete enthielt 5 Strontiumbehälter als Nutzlast und wurde für den Bereich Extraterrestrische Physik an der Ruhr-Universität Bochum gestartet. Die vierte Rakete, mit 2 Bariumbehältern gehörte einer englischen Forschergruppe.

3. Aufbau des Fotometers und Labortests

3.1. Gesamtaufbau

Allgemeines

Das gesamte Fotometer besteht aus zwei völlig gleich aufgebauten einzelnen Fotometerkanälen, welche mechanisch verbunden sind und eine gleichgerichtete optische Achse haben. In Abb.3.1 ist der schematische Aufbau eines Fotometerkanales wiedergegeben.

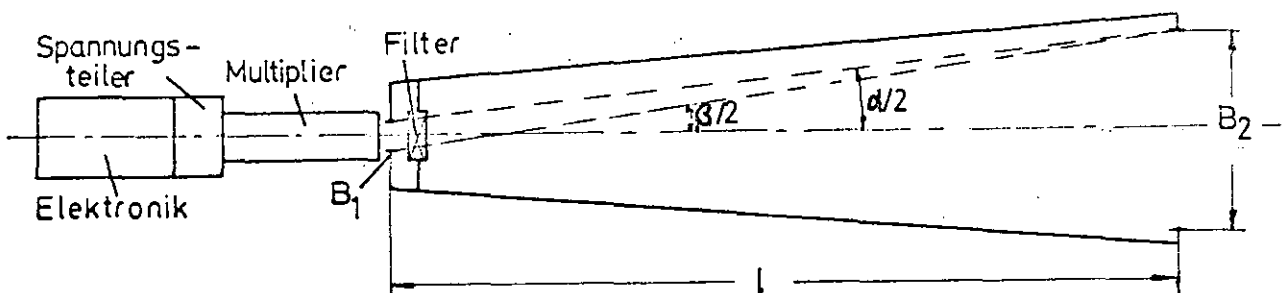


Abb.3.1 Schematischer Aufbau eines Fotometerkanales

Durch ein Blendensystem mit den Blenden B_1 und B_2 wird ein Öffnungswinkel α definiert.

$$\alpha = 2 \arctan(B_2 - B_1)/2l \quad (3.1)$$

Der maximale Winkel bei welchem noch Licht auf den Fotomultiplier fällt ist β . Aus der Differenz $\beta/2 - \alpha/2$ ergibt sich der Randwinkel γ .

$$\gamma = \arctan 4B_1 l / (4l^2 + B_2^2 - B_1^2) \quad (3.2)$$

Innerhalb des Randwinkels ist die Empfindlichkeit des Fotometers nicht definiert.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die in Abb.3.2 dargestellte idealisierte Fotometercharakteristik.

Die Blende B_2 am Fotometer kann durch einschraubbare Ringe so verändert werden, daß sich bei einer Blendenöffnung $B_1=1\text{cm}$ folgende Öffnungswinkel ergeben, 10° , 8° , 6° , 4° .

In Tabelle 3.1 sind einige Daten bezüglich dieser Winkel zusammengestellt.

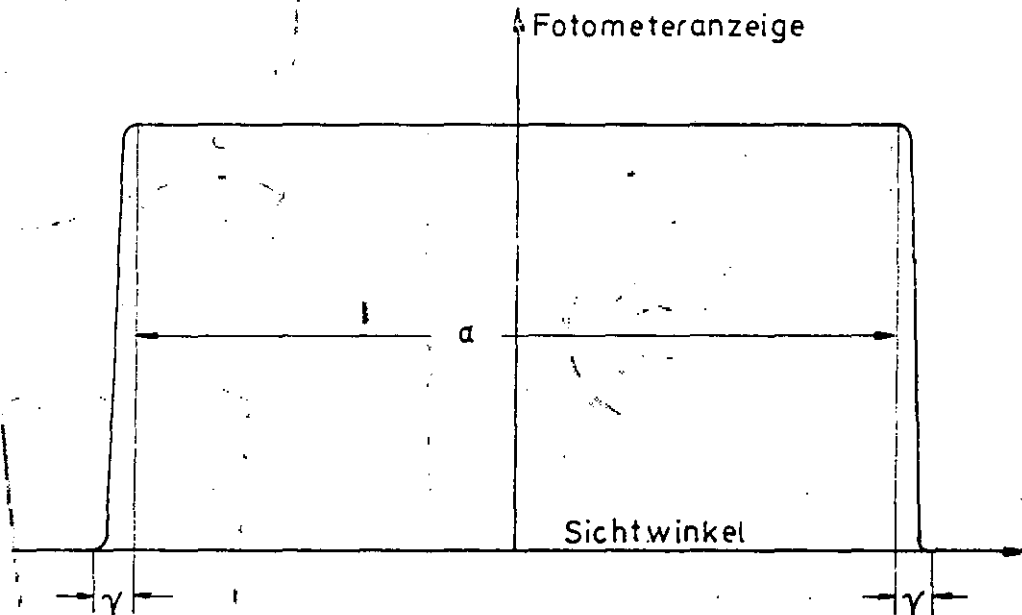


Abb. 3.2 Idealisierte Fotometercharakteristik

B_2/cm	$B_1=1\text{cm}$		$B_1=4\text{cm}$	
	α	γ	α	γ
18,4	10	0,56	8,24	2,29
14,9	8	0,57	6,24	2,29
11,4	6	0,58	4,24	2,29
7,9	4	0,58	2,24	2,29

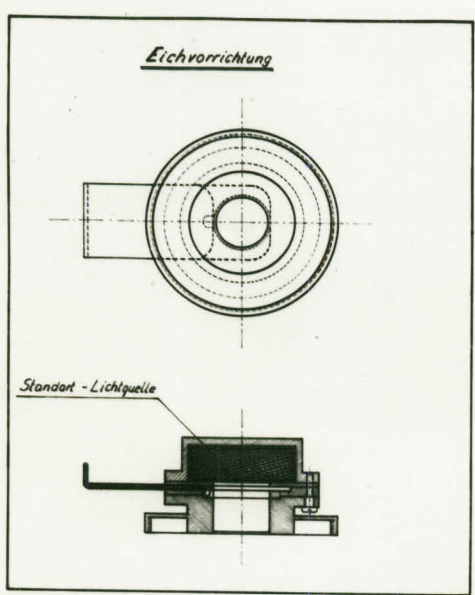
Tabelle 3.1

Beschreibung eines Kanales

Abb. 3.3 zeigt das Schnittbild eines kompletten Fotometerkanales. Die Blendscheibe B_1 läßt sich von außen verstellen und bewegt sich unmittelbar vor dem Eintrittsfenster des Fotomultiplifiers. Durch eine federnde Einrastarretierung lassen sich 4 Blendenöffnungen von 4, 2, 1 und 0,5cm Durchmesser in der Mitte des Eintrittsfensters feststellen.

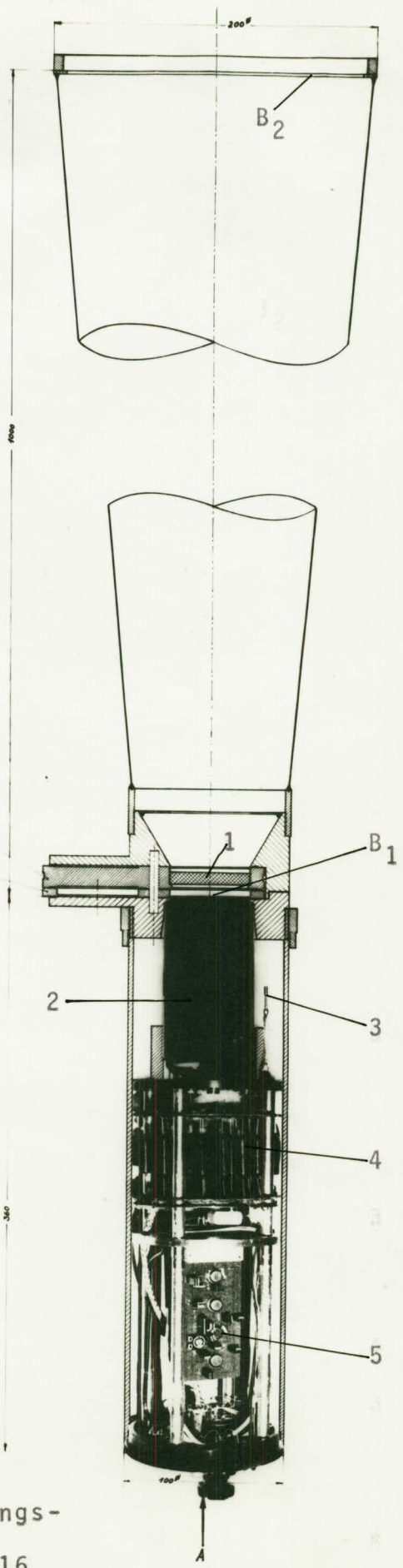
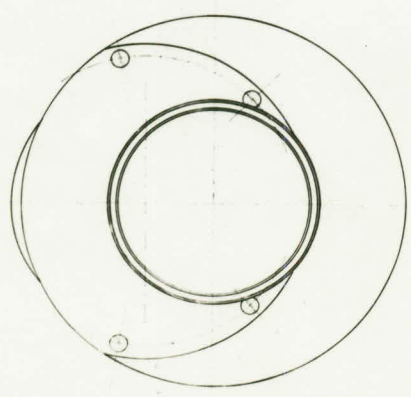
Auf der selben Achse wie die Blendscheibe, ebenfalls drehbar gelagert und mit Arretierungen versehen, befindet sich eine Scheibe mit drei Filterfassungen. Diese können von außen wahlweise in den Strahlengang des Fotometers eingeschaltet werden.

FOTOMETER



Filterscheibe
3 Fassungen 30 mm ϕ
Blendenscheibe
4 Blenden
10, 20, 10, 5 mm ϕ

Ansicht A



2
32
5

Abb.3.3 Schnittzeichnung eines Fotometerkanales.
 1=Filter, 2=Fotomultiplier, 3=Temperaturfühler, 4=Spannungsteiler, 5=Elektronik.
 Eichvorrichtung siehe Abb.3.16

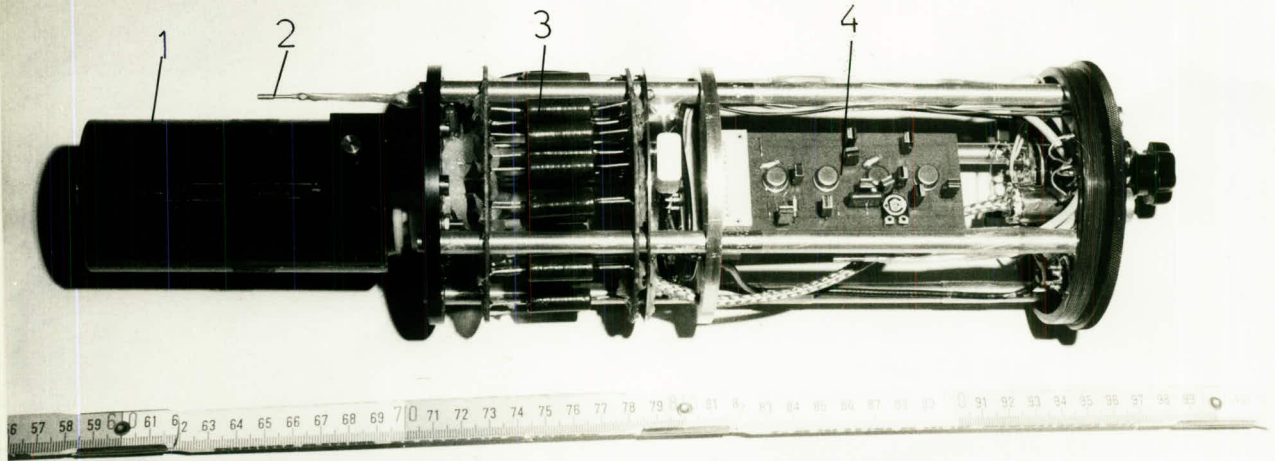


Abb.3.4 Einschub eines Fotometerkanales. 1=Fotomultiplier mit Mu-Metallabschirmung, 2=Temperaturfühler, 3=Spannungsteiler, 4=Elektronik.

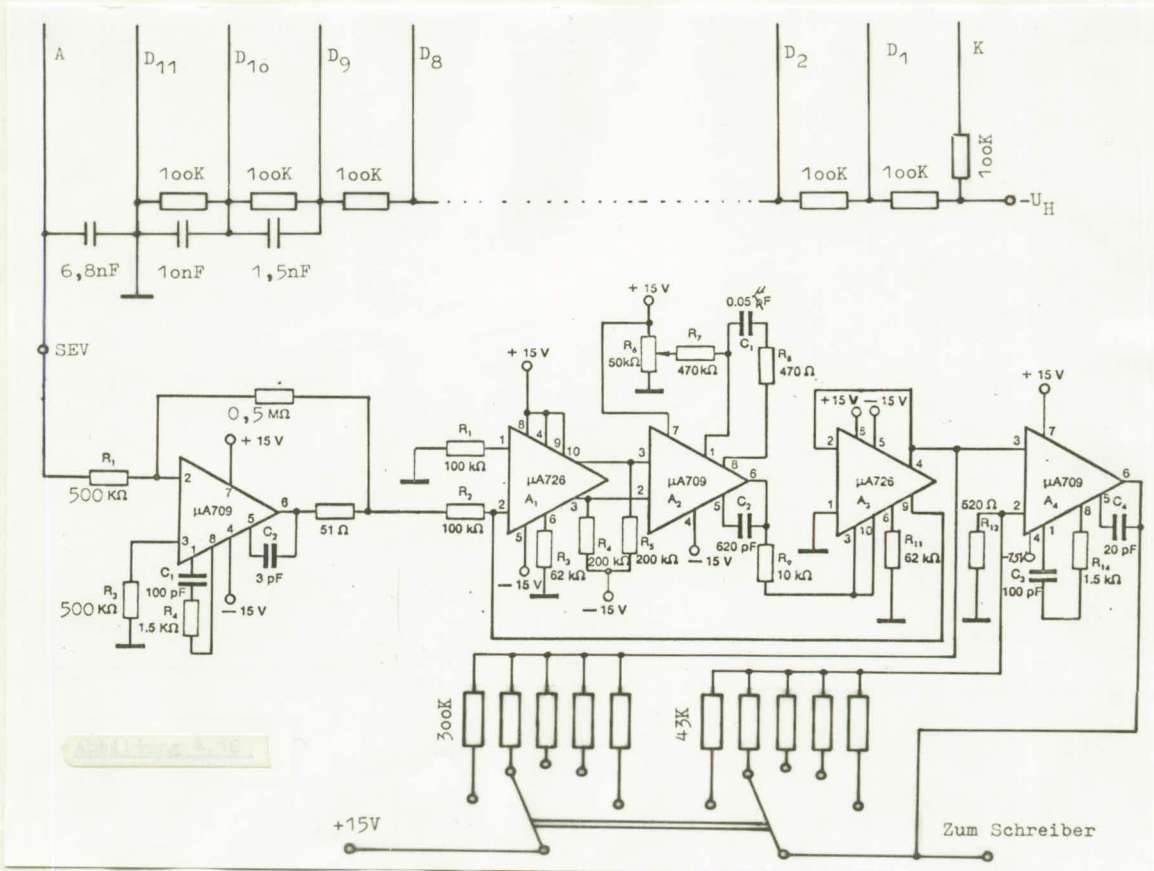


Abb.3.5 Gesamte elektronische Schaltung eines Fotometerkanales (Vgl.3.3.). A=Anode, D=Dynode, K=Kathode.

Während der Messungen in Abisko war in einer der Filterfassungen ein Interferenzfilter, eine Öffnung blieb frei und die dritte wurde durch eine Metallscheibe lichtdicht abgeschlossen.

Der Fotomultiplier ist von einer Mu-Metall-Abschirmung umgeben um magnetische Störungen des Fotomultipliers auszuschalten. An den Fotomultiplier schließt sich der Spannungsteiler und die Elektronik an; sie bilden zusammen eine Einheit (Abb.3.4) und lassen sich am hinteren Ende des Fotometers heraus-schrauben.

Die gesamte, in dem Einschub untergebrachte Schaltung, ist in Abb.3.5 dargestellt.

Aufbau in Abisko

Abb.3.6 zeigt den Gesamtaufbau wie er in Abisko verwendet worden ist.

Die beiden Fotometerkanäle 1 und 2 sind in einer Stativgabel 3 drehbar gelagert. Auf der gleichen Welle und mit paralleler optischer Achse ist noch ein Diopter 4, eine automatische Kleinbildkamera 5 (Balda) und eine normale Kleinbildkamera 6 angeordnet. Die beiden Fotometerkanäle sind durch einen Zwischenkasten 11 miteinander verbunden. Dieser Kasten enthält ein Ausgleichsgewicht, ein Doppelmeßinstrument und einen Verteiler. Das Meßinstrument liegt elektrisch parallel zum Schreiber und zeigt an, ob das Fotometer arbeitet.

In beiden Fotometerkanälen befindet sich jeweils am Fotomultiplier und an der Elektronik ein Temperaturmeßfühler. Ein fünfter Meßfühler, der im Zwischenkasten untergebracht ist, mißt die Außentemperatur. Durch einen Meßstellenwähler konnten die einzelnen Temperaturfühler an ein Meßinstrument angeschlossen werden.

In der während der ganzen Expeditionszeit auf $+20^{\circ}\text{C}$ thermostatisierten Leichtmetallkiste 7 sind der Schreiber 8 und die beiden Netzgeräte 9 (Hochspannung und $\pm 15\text{V}$) untergebracht. Mit dem Ringkerntransformator 10 kann die Netzspannung regu-



Abb.3.6 Aufbau in Abisko

liert werden. Die automatische Kleinbildkamera 5 wird elektrisch fernbedient und hält im Bild fest, was sich momentan im Blickfeld des Fotometers befindet. Zum Schutz gegen die Kälte (-15°C) ist sie mit einem elektrischen Heizstrumpf umwickelt.

3.2. Lichtsensoren

Allgemeines

Die Lichtintensitäten, welche nachgewiesen werden sollen, sind zu gering um mit einer einfachen Fotodiode gemessen zu werden. Es wurden deshalb Fotomultiplier des Typs 6097B der Firma EMI verwendet. Der Fotomultiplier hat 11 Dynoden und eine CsSb0 (S-11) Kathode. Die Empfindlichkeitskurve der Kathode ist in Abb.3.7 wiedergegeben (2).

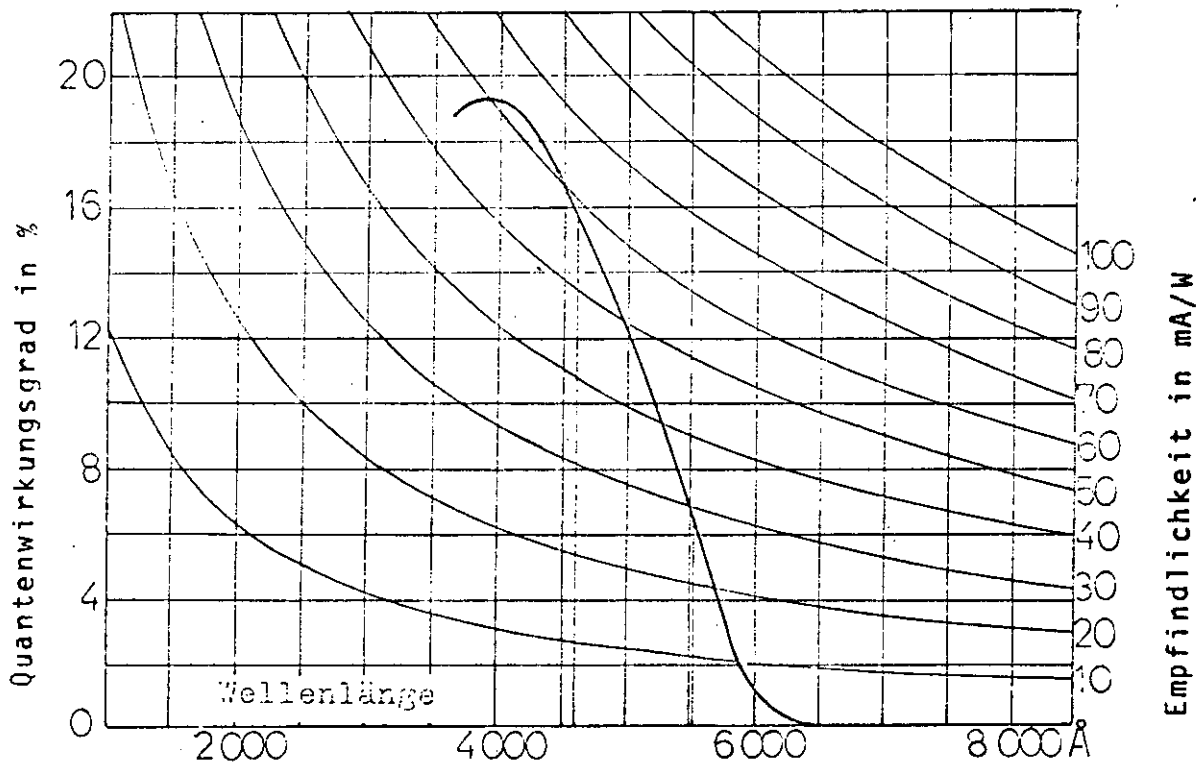


Abb.3.7 Spektrale Empfindlichkeit der S11-Kathode†)

Der Quantenwirkungsgrad ist definiert durch:

$$Q(\lambda) = (n_e/n_0)100\%$$

n_e = Anzahl der freigesetzten Elektronen, n_0 = Anzahl der einfallenden Photonen

†) Bezogen auf eine Kathodenempfindlichkeit von 70µA/lm

den Quanten.

Aus Abb.3.7 ergeben sich für die beiden zu messenden Linien folgende Werte.

Wellenlänge/Å	5535	4607	<u>Tabelle 3.2</u>
Quantenwirkungsgrad/%	6,5	15,7	
Empfindlichkeit/mA/W	29	58	

Die von der Lieferfirma (Neye Enatechnik) angegebenen Eichdaten der verwendeten Fotomultiplier sind in Tab.3.3 zusammengestellt.

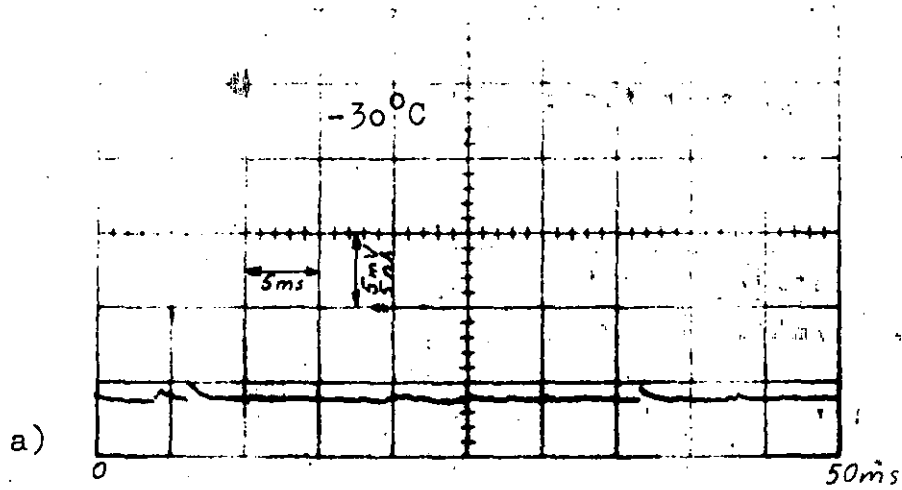
Fotometerkanal	1	2	<u>Tabelle 3.3</u>
Kathodenempfindlichkeit/µA/lm	78	62	
Gesamtspannung/V zur Erreichung einer Empfindlichkeit von 200A/lm	1490	1530	
Dunkelstrom bei dieser Spannung/nA	1,1	1,4	

Ein Lichtquant, welches an der Kathode ein Elektron freisetzt, erzeugt an der Anode des Fotomultipliers einen Stromstoß, da das Elektron an den Dynoden des Fotomultipliers vervielfältigt wird und ca. 10^6 Elektronen die Anode erreichen.

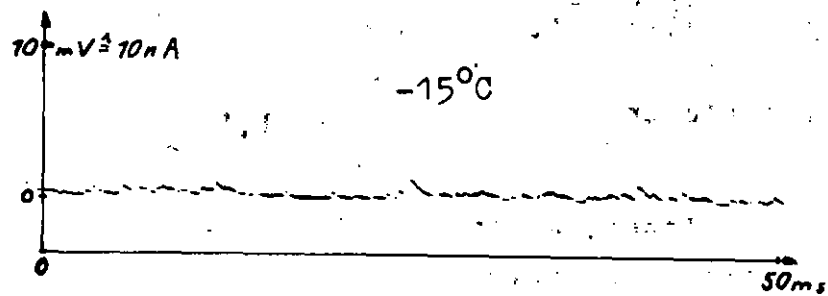
Wenn kein Licht auf die Fotokathode fällt werden durch thermische Energien trotzdem Elektronen freigesetzt. In Abb.3.8a und b sind solche Dunkelimpulse oder der Dunkelstrom bei verschiedenen Temperaturen dargestellt.

Wird der Fotomultiplier mit einer Anzahl von Quanten/s bestrahlt, welche soviel Elektronen/s freisetzen, daß das Auflösungsvermögen überschritten wird, dann überlagern sich die von den einzelnen Quanten erzeugten Elektronenlawinen und es entsteht ein ungeglätteter Gleichstrom (Abb.3.8c).

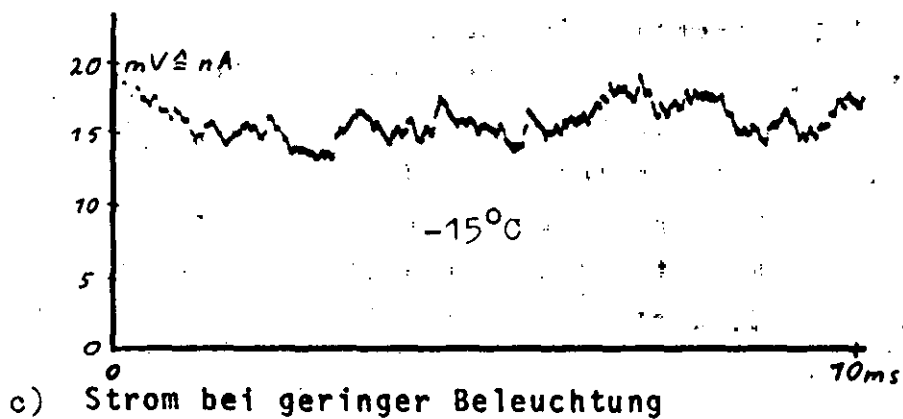
Zur Aufnahme der Bilder in Abb.3.8 wurde der Fotomultiplier nach Abb.3.5 geschaltet und an der Stelle SEV von der übrigen Schaltung getrennt, dort wurden die Signale für das Oszilloskop (1M,20pF) abgegriffen.



Dunkelstrom



Dunkelstrom



Strom bei geringer Beleuchtung

Abb.3.8 Anodenstrom des Fotomultipliers

Strahlungsfluß

Um eine Vorstellung von der Größenordnung des zu erwartenden Strahlungsflusses ϕ zu bekommen, soll eine Abschätzung vorgenommen werden.

Das vorliegende Problem kann als Zustrahlung zweier Flächen aufgefaßt werden. Wendet man darauf das fotometrische Grundgesetz an unter der Voraussetzung einer großen Entfernung zwischen den Flächen und eines kleinen Raumwinkels, so erhält man, daß die Strahldichte L am Ort des Fotometers gleich der am Ort der Wolke ist. Aus diesen Überlegungen ergibt sich:

$$\phi = 4\pi L A \omega / 4\pi \quad (3.3)$$

A =Sensorfläche, ω =Raumwinkel.

Aus früheren Messungen lag für die Wolken ein Erfahrungswert von $4\pi L = 100\text{KR}$ (Kilo Rayleigh) vor. Wenn man als Richtwerte $A = 12,6\text{cm}^2$ ($B_1 = 4\text{cm}$) und $\omega = 6 \cdot 10^{-3}\text{sr}$ wählt, so ergibt sich:

$$\phi = 6 \cdot 10^8 \text{Quanten/s}$$

Für das Auflösungsvermögen des Fotomultipliers wird ein Wert von 70MHz angegeben, d.h. wenn nicht mehr als $7 \cdot 10^7$ Quanten/s an der Fotokathode Elektronen freisetzen, so können sie getrennt nachgewiesen werden. Aus der vorherigen Rechnung kann man entnehmen, daß ca. $6 \cdot 10^8$ Quanten/s die Kathode erreichen und bei einem Quantenwirkungsgrad von ca. 10% $6 \cdot 10^7$ Elektronen/s erzeugen, d.h. die Grenze des Auflösungsvermögens ist erreicht; insbesondere wenn man berücksichtigt, daß der Wert von 100KR noch erheblich überschritten werden kann.

Labortests

In Abb.3.9 ist der Anodenstrom der Fotomultiplier als Funktion der angelegten Hochspannung wiedergegeben. Die Meßanordnung bestand aus dem kompletten Fotometer. An der Stelle SEV des Schaltbildes in Abb.3.5 wurde der Schreiber angeschlossen, d.h. der Fotometerverstärker wurde nicht benutzt. Auf diese Weise wirkten der Eingangswiderstand des Verstärkers und des Schreibers in Parallelschaltung als Arbeitswiderstand des Fotomultipliers ($R_A = 0,333\text{M}\Omega$). Als Lichtquelle wurde die radioaktive Standard-Lichtquelle (Vgl.3.4.) unter Zwischenschaltung eines

Grauglases von 50% Durchlässigkeit und einer Blende B_1 von 0,5cm benutzt. Ein Filter wurde nicht eingeschaltet.

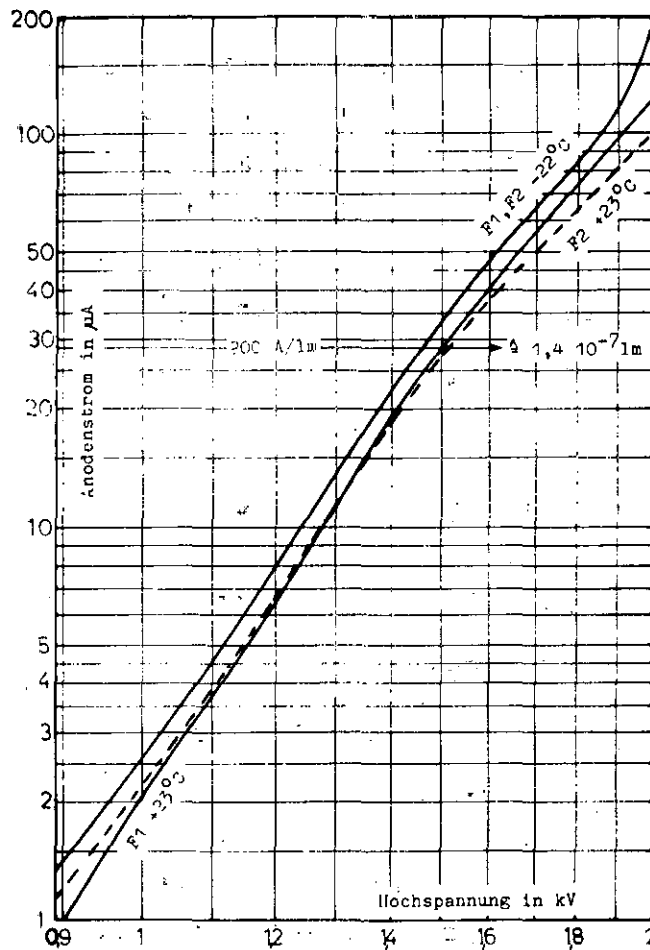


Abb.3.9 Empfindlichkeit der Fotomultiplier als Funktion der Hochspannung. F1,F2=Fotometerkanal 1bzw.2

Die Messung erfolgte bei zwei um 45°C auseinanderliegenden Temperaturen ($+23^\circ\text{C}$ und -22°C). Die Meßwerte wurden entsprechend der Temperaturabhängigkeit der Lichtausbeute der Standard-Lichtquelle (Abb.3.18) und der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes R_A reduziert.

Abb.3.9 zeigt, daß ungeachtet der vorgenommenen Reduktionen eine starke Abhängigkeit der Fotometeranzeige von der Temperatur besteht. Eine Abhängigkeit des Fotomultiplierstromes von der Temperatur ist auch in {4} aufgeführt. Als Erklärung wird eine Abhängigkeit der Spektralempfindlichkeit der Kathode und des Sekundäremissionskoeffizienten von der Temperatur ange-

nommen.

Unter Zuhilfenahme der Werte aus Tabelle 3.3 kann man schließen, daß die Fotomultiplier einem Lichtstrom von $1,4 \cdot 10^{-7} \text{lm}$ ausgesetzt waren. Dieser Wert wird bei der Berechnung der absoluten Bestrahlungsstärke in Kap.6.2. verwendet.

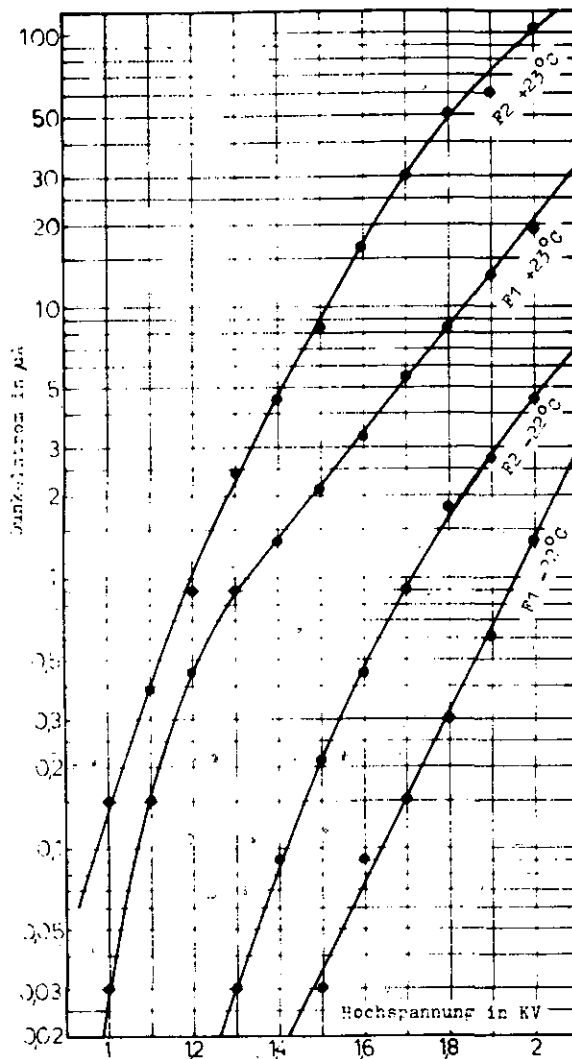


Abb.3.10 Dunkelstrom der Fotomultiplier. F1,F2=Fotometerkanal 1 bzw.2 .

Mit der selben Meßanordnung, mit welcher die Kurven in Abb.3.9 gemessen wurden, ist auch jeweils der Dunkelstrom als Funktion der Hochspannung ermittelt worden (Abb.3.10). Von den Meßwerten, welche den Kurven in Abb.3.9 zugrunde liegen, sind die Werte für den Dunkelstrom abgezogen worden.

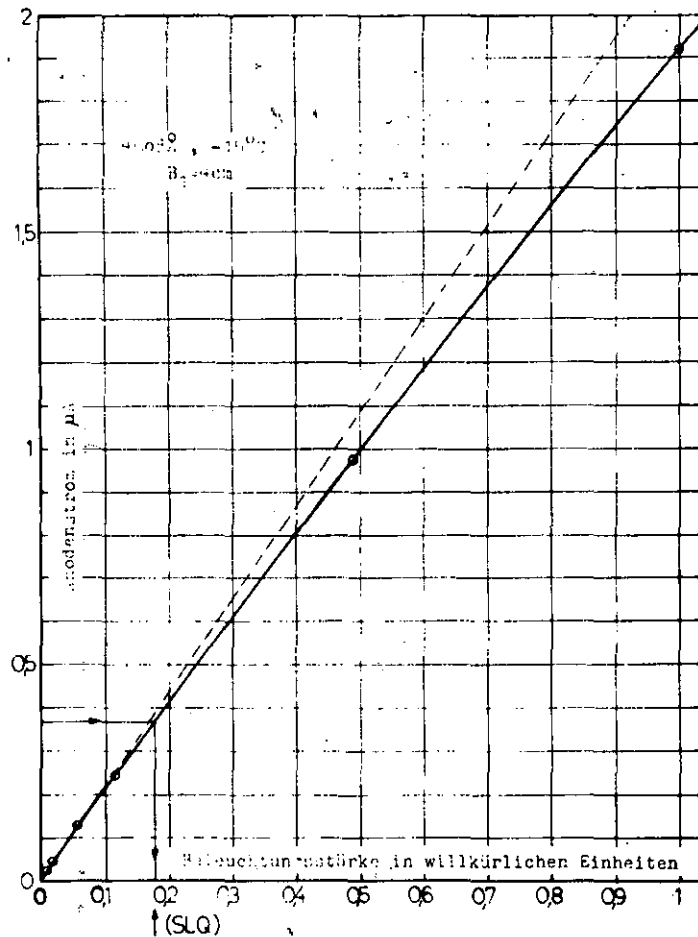


Abb. 3.11 Nichtlinearität der Fotomultiplier.
SLQ=Standard-Lichtquelle.

Von großem Interesse für die folgenden Auswertungen ist die Frage nach der Linearität zwischen Lichtstrom und Anodenstrom am Fotomultiplier. Wie aus {7} hervorgeht, kann die Linearität des Fotomultipliers von der Wellenlänge abhängen. Aus diesem Grunde wurde am F1 eine Linearitätsuntersuchung vorgenommen und zwar unter Einschaltung des Interferenzfilters von 4608\AA mit welchem auch die Messungen in Abisko durchgeführt worden sind.

Der Meßaufbau entspricht dem, mit welchem die Kurven in Abb. 3.9 ermittelt wurden; an die Stelle der Standard-Lichtquelle tritt jedoch eine Glühbirne, da auch bei höheren Beleuchtungsstärken gemessen werden sollte. Das Ergebnis ist in Abb. 3.11 wiedergegeben.

Um eine Referenzbeleuchtungsstärke zu bekommen, wurde auch

eine Messung mit der Standard-Lichtquelle. (SLQ) durchgeführt; dieser Punkt ist in dem Diagramm eingezeichnet.

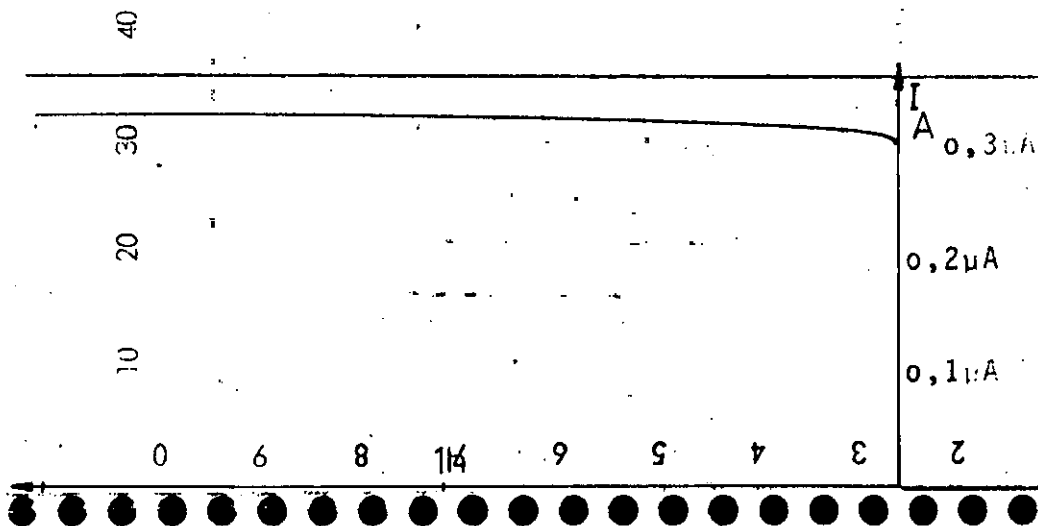


Abb.3.12 Anlaufverhalten des Fotometers

Für die Praxis sind vorallem auch die Drifteigenschaften des Fotometers von Interesse. Vorversuche zeigten, daß ein Fotomultiplier welcher über einen räumlich kleinen Spannungsteiler betrieben wird, über eine sehr lange Zeit nach dem Einschalten (ca.1,8h) noch keinen konstanten Fotostrom aufwies.

In Abb.3.12 ist das Anlaufverhalten des Fotometerkanals F1 wiedergegeben. (Aufbau des Spannungsteilers siehe Anhang).

3.3. Verstärkung und Registrierung

Der Gleichstrom, welcher am Ausgang des Fotomultipliers auftritt (Abb.3.8c) wird durch ein RC-Glied geglättet. Er liegt in der Größenordnung von 10^{-6} A. Durch diesen Strom wird am Arbeitswiderstand $R_A=0,5M$ ein Spannungsabfall von 0,5V erzeugt.

Da die Größe des zu messenden Strahlungsflusses nicht genau bekannt war, wurde das lineare Ausgangssignal des Fotomultipliers durch einen Verstärker logarithmiert. Auf diese Weise

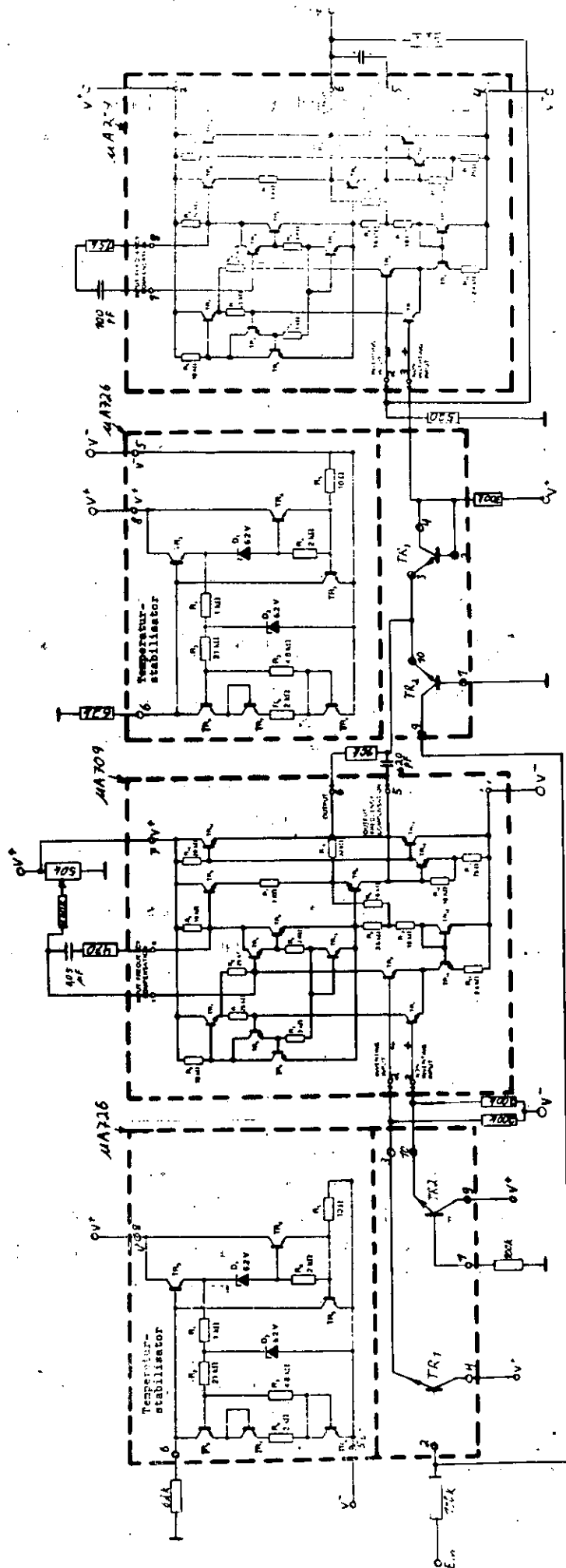


Abb. 3.13 Logarithmischer Verstärker

können Schwankungen des Strahlungsflusses über mehrere Zehnerpotenzen auf dem Schreiber so registriert werden, daß noch auswertbare Ergebnisse zur Verfügung stehen.

Einer Schrift der Firma Fairchild wurde das Schaltbild eines temperaturstabilisierten logarithmischen Differenzverstärkers entnommen (siehe Abb.3.13). Der Verstärker ist aus 4 integrierten Halbleiterbausteinen aufgebaut.

In der Abbildung 3.13 ist das Schaltbild aufgezeichnet und zwar unter Hinzunahme der in den einzelnen integrierten Bausteinen realisierten Schaltungen. Die dicken gestrichelten Linien geben jeweils die Abgrenzungen der einzelnen Bausteine an.

Durch das Verändern von zwei Widerstandswerten innerhalb der Schaltung lassen sich der Nullpunkt und die logarithmische Steilheit der Verstärkerkennlinie verändern (Abb.3.5 und 3.13).

Da der Verstärker nur positive Eingangssignale verarbeitet, der Fotomultiplier aber negative abgibt, wurde ein Invertierverstärker eingefügt. Das vereinfachte Schaltbild dieses Verstärkers mit der Verstärkung -1 und dem Eingangswiderstand $R_1=0,5M$ ist in Abb.3.14 dargestellt. R_1 ist identisch mit dem Arbeitswiderstand R_A des Fotomultipliers.

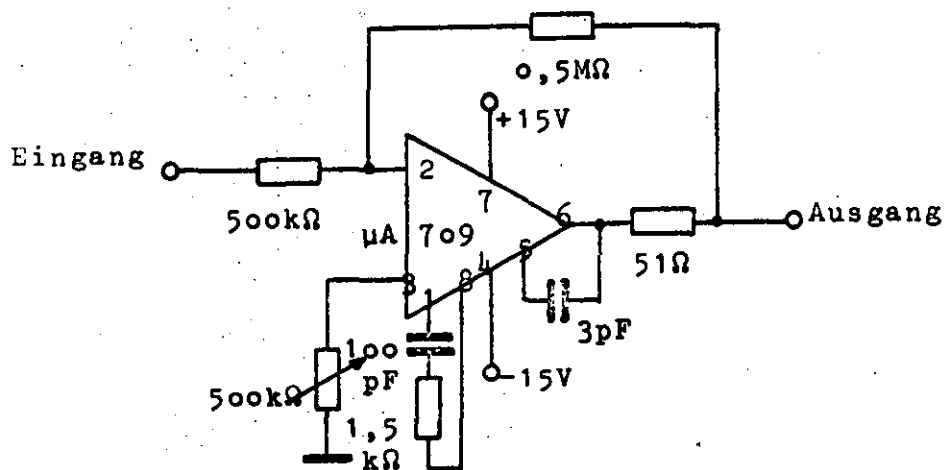


Abb.3.14 Invertierverstärker

Für die beiden Verstärker (Abb.3.13 u.3.14) wurde je eine gedruckte Schaltung entworfen. Von jedem Verstärker wurden

4 Exemplare in Form von Steckkarten hergestellt, so daß bei Versagen eine schnelle Möglichkeit des Auswechslens bestand (Abb.3.4 Pos.4).

Die beiden variablen Widerstände, welche die Verstärkercharakteristik beeinflussen, wurden nicht mit auf die Steckkarte genommen, sondern über Zuleitungen an zwei Stufenschalter geführt, um schnelle Veränderungen zu ermöglichen (Abb.3.5).

In Abb.3.15 sind die Verstärkerkennlinien für $+20^{\circ}\text{C}$ und -15°C aufgezeichnet. Es ist eine Temperaturabhängigkeit vorhanden. Weiterhin geht aus der Abbildung hervor, daß der Verstärker nur im Bereich von -1 bis -10V Eingangsspannung logarithmisch arbeitet.

Von der Möglichkeit der Kennlinienveränderung durch Variation der Widerstände ist im vorliegenden Anwendungsfall kein Gebrauch gemacht worden.

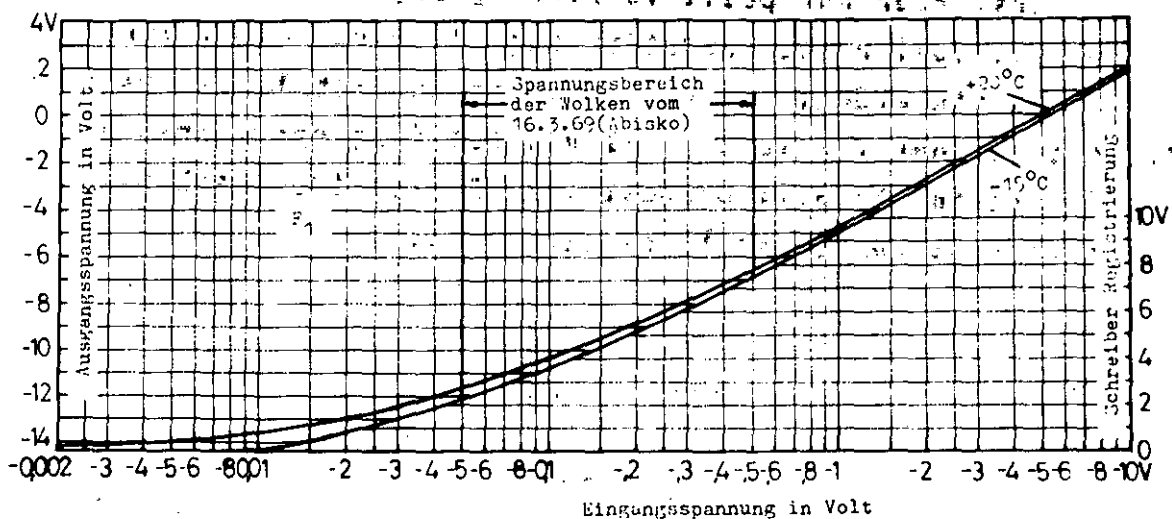


Abb.3.15 Kennlinie des Verstärkers gemäß Abb.3.5

Der Verstärkerausgang wird über ein Koaxialkabel direkt mit dem Schreiber verbunden.

Für die Registrierung wurde ein Zweikanalschreiber benutzt (320 Dual-Channel DC Amplifier Recorder von Hewlett Packard). Die Registrierung erfolgte über Wärmefedern auf ein Spezialpapier. Neben den beiden Registrierkanälen ist noch eine Feder angebracht, welche in-oder externe Zeitimpulse aufzeichnen kann. Die zur Verfügung stehende Registrierbreite pro Kanal beträgt

5cm. Der Nullpunkt läßt sich beliebig über die Registrierbreite und etwas darüber hinaus verschieben.

3.4. Eichvorrichtung und Filter

Um eine Kontrolle der Empfindlichkeit des Fotometers durchführen zu können, wurde eine Vorrichtung für Relativeichungen entwickelt (Abb.3.16). Sie besteht aus einem Gehäuse 1, welches die Standard-Lichtquelle 2 enthält, einen Schieber 3 zum lichtdichten Verschuß des Gehäuses und einem gleichzeitig zur Aufnahme von Graugläsern bestimmten Adapterring 4.

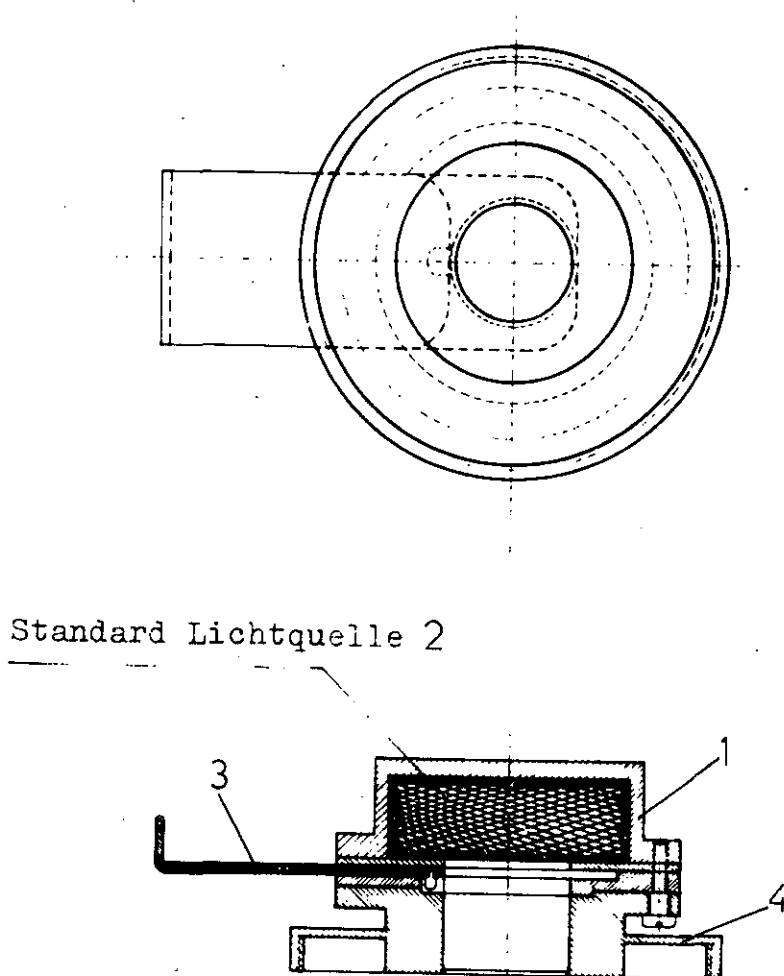


Abb.3.16 Eichvorrichtung. 1=Gehäuse, 3=Schieber, 4=Adapterring.

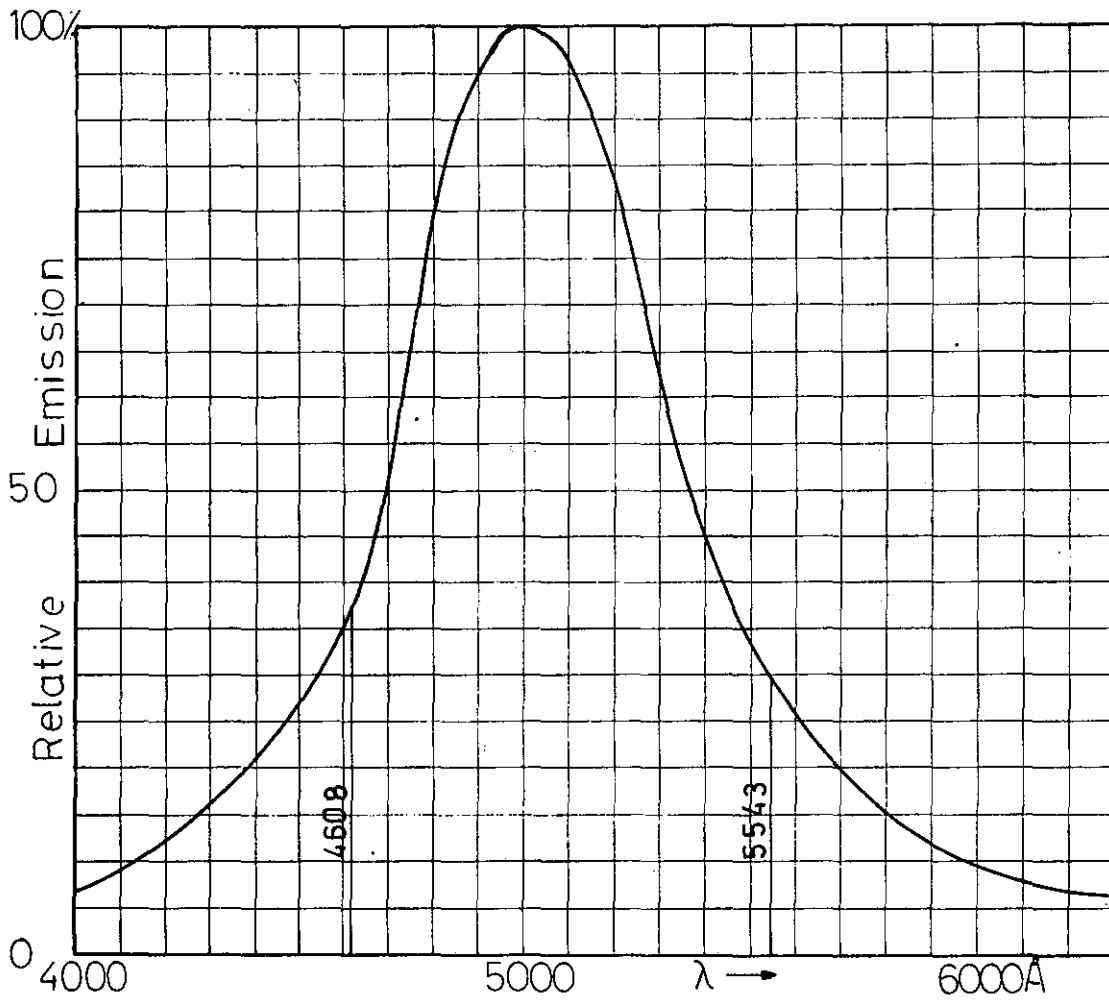


Abb.3.17 Spektrale Energieverteilung der Standard-Lichtquelle.

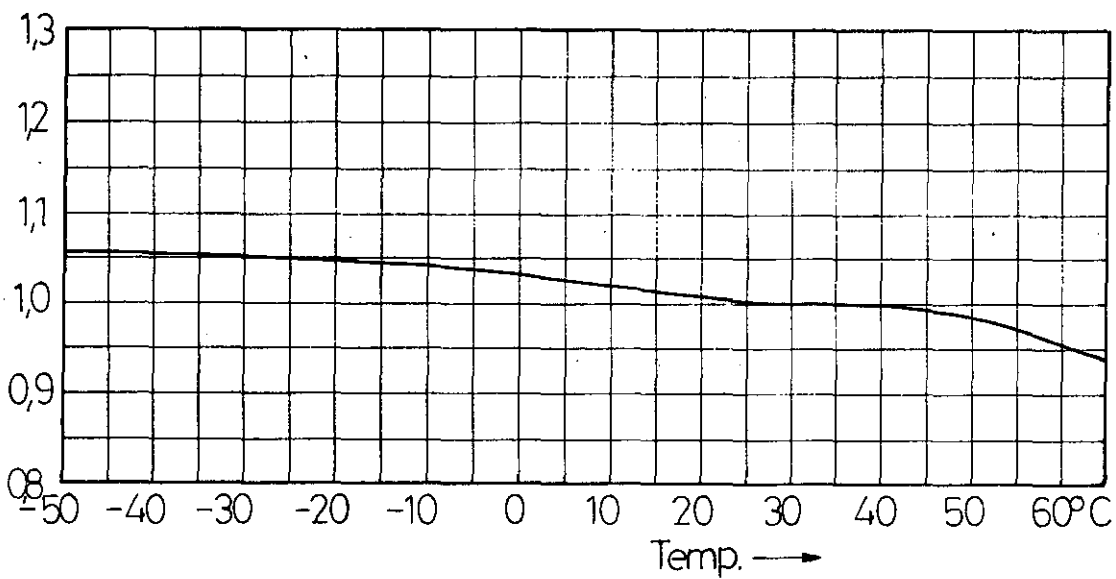


Abb.3.18 Relative Lumineszenzausbeute.

Als Standard-Lichtquelle dient eine von der Firma United States Radium Corporation hergestellte und kalibrierte radioaktive Lichtquelle. Ihre maximale Flächenhelligkeit beträgt $14\mu\text{Lambert}$. Die spektrale Helligkeitsverteilung der Lichtquelle ist in Abb.3.17 und die Helligkeit als Funktion der Temperatur in Abb.3.18 wiedergegeben.

Um bei der Eichung mehrere Meßpunkte zu gewinnen, wurden zwischen Lichtquelle und Fotometer wahlweise drei Zeiss-Graufilter (Vgl.Tab.3.4) eingefügt.

Grauglas Nr.	Durchlässigkeit bei 4608Å	5543Å
1	0,492	0,491
2	0,117	0,118
3	0,020	0,0206

Tabelle 3.4

Grauglasdurchmesser 29mm.

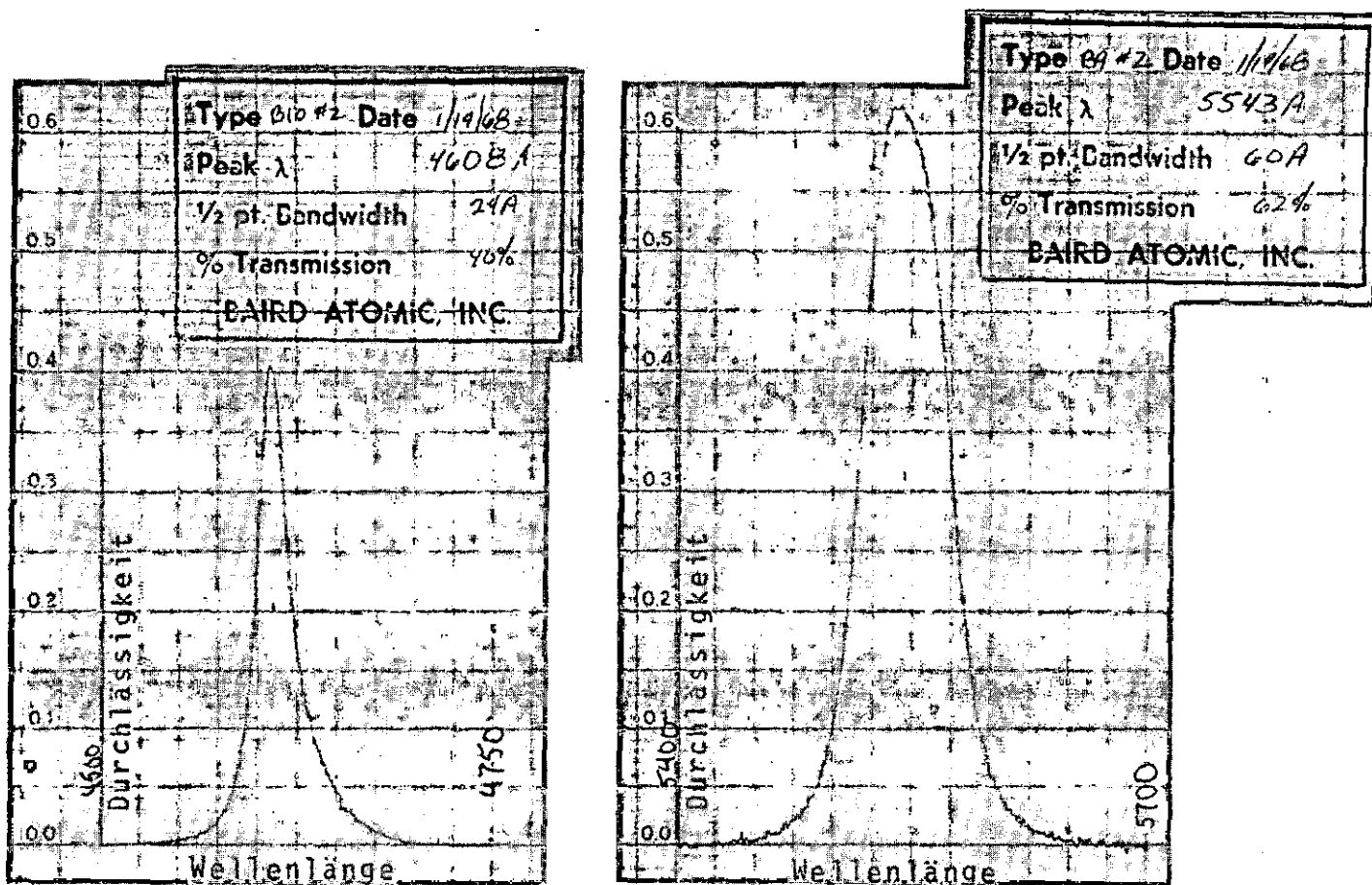


Abb.3.19 Durchlässigkeitskurven der beiden benutzten Filter.

Um nur die Linien des neutralen Strontium oder Barium messen zu können, wurden zwei Interferenzfilter der Firma Baird Atomic Typ B10 benutzt. Die Durchlässigkeitskurven der beiden Filter sind in Abb.3.19 wiedergegeben.

3.5. Fotometercharakteristik

Siehe hierzu auch Kap.3.1.

An dieser Stelle sollen zwei gemessene Fotometercharakteristiken wiedergegeben werden. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven besteht darin, daß Abb.3.21 unter Verwendung eines Linsensystems aufgenommen und in Abb.3.20 mit einem Blendensystem gemessen wurde.

Dieser Gegenüberstellung kommt eine besondere Bedeutung zu, da aus ihr der Schluß gezogen wurde, daß das Blendensystem dem Linsensystem überlegen ist. In Abb.3.22 ist der Aufbau des Linsensystems wiedergegeben.

Bei Verwendung des Linsensystems hätte man eine recht starke Abhängigkeit der Fotometeranzeige vom Ort der Lichtquelle innerhalb des Blickwinkels in Kauf nehmen müssen.

Ein Vorteil des optischen Systems besteht in der größeren Lichtstärke, d.h. das Fotometer wird empfindlicher. Durch Vorversuche, bei welchen die Helligkeit des Nachthimmelshintergrundes gemessen und mit früheren Werten aus Kiruna verglichen wurde, konnte jedoch geklärt werden, daß die mit dem Blendensystem erreichbaren Empfindlichkeiten für den vorliegenden Anwendungsfall ausreichen.

Die in den Abb.3.20 u. 3.21 wiedergegebenen Kurven sind im Labor unter Verwendung einer konstanten Lichtquelle von 1mm Durchmesser in 10m Entfernung ermittelt worden.

Das verwendete Blendensystem hatte nur eine Länge von 0,5m, während das Fotometer in der endgültigen Form ein Blendensystem von 1m Länge erhalten hat.

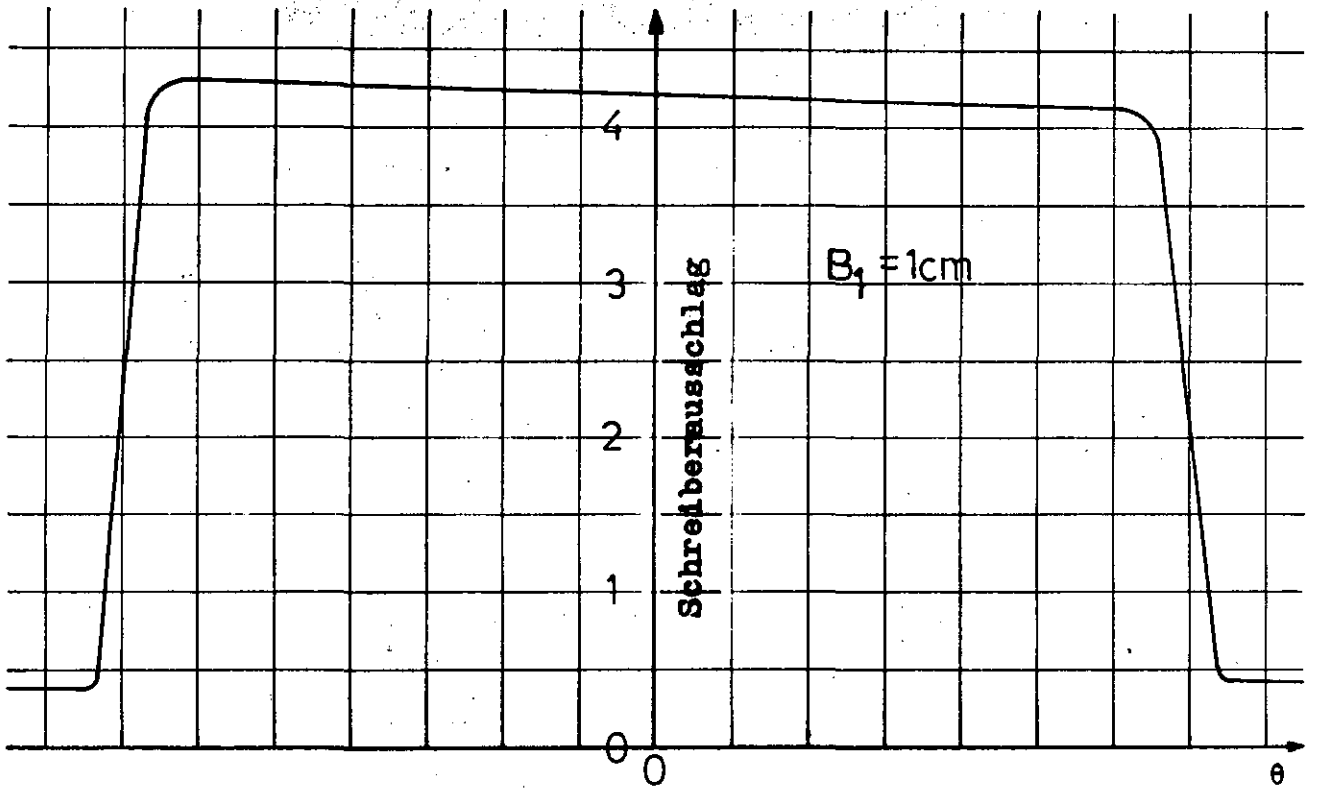


Abb.3.20 Fotometercharakteristik (Blendensystem ohne Interferenzfilter)

θ = Einfallswinkel gegen die optische Achse

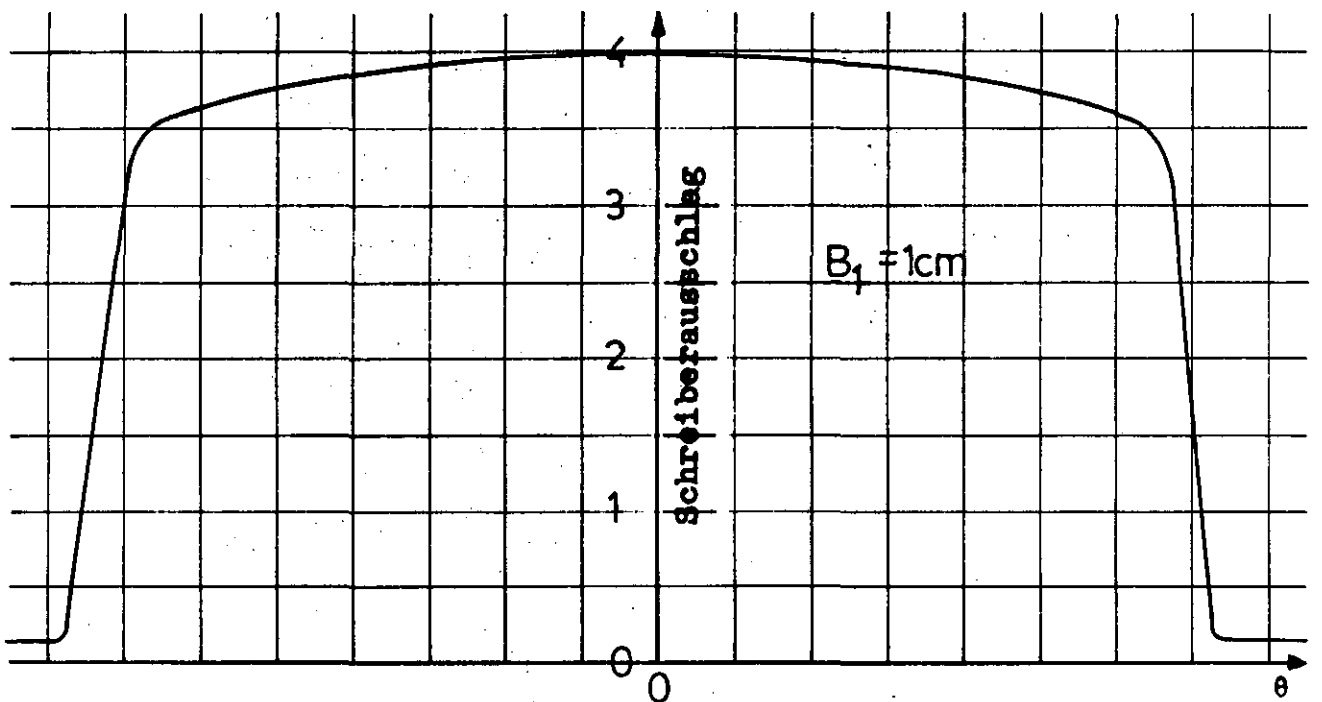
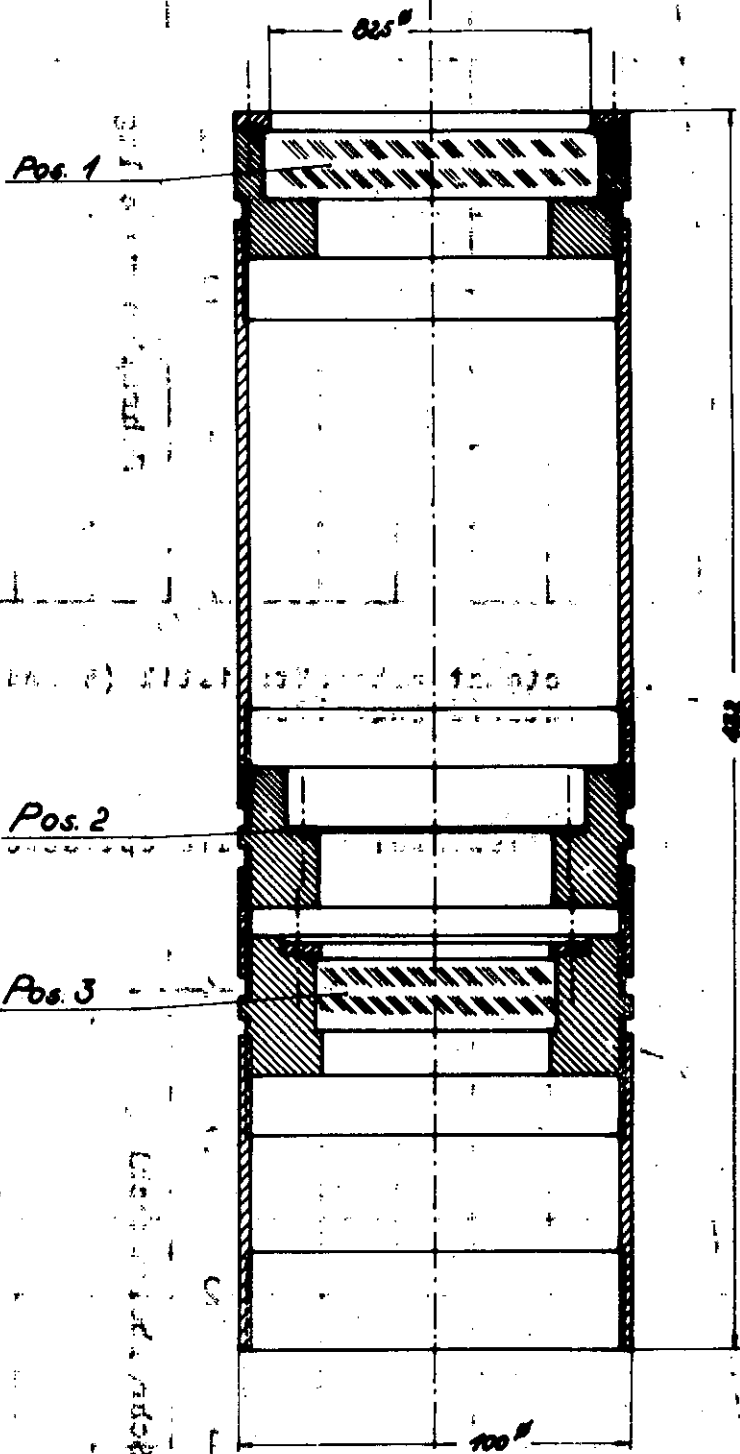


Abb.3.21 Fotometercharakteristik (Linsensystem ohne Interferenzfilter)

Fotometer - Objektiv



- Pos. 1 **Objektivlinse** Aplanatisches
Leseglas f=16,6cm
- Pos. 2 **Blende**
- Pos. 3 **Feldlinse** Aplanatisches
Leseglas f=8,3cm

Abb.3.22 Linsensystem

Der schräge Verlauf des Plateaus in Abb.3.20 findet sich als Tendenz auch in der Kurve der Abb.3.21 wieder und ist durch eine unterschiedliche Laborhintergrundsstrahlung bedingt.

Der Öffnungswinkel betrug ca. 10° .

Mit dem Zweikanalfotometer wurde in Abisko die Charakteristik unter Zuhilfenahme eines Sternes aufgezeichnet. Die Bewegungsrichtung des Fotometers verlief vom Horizont zum Zenit. In Abb.3.23 ist die Aufzeichnung für beide Fotometerkanäle wieder gegeben.

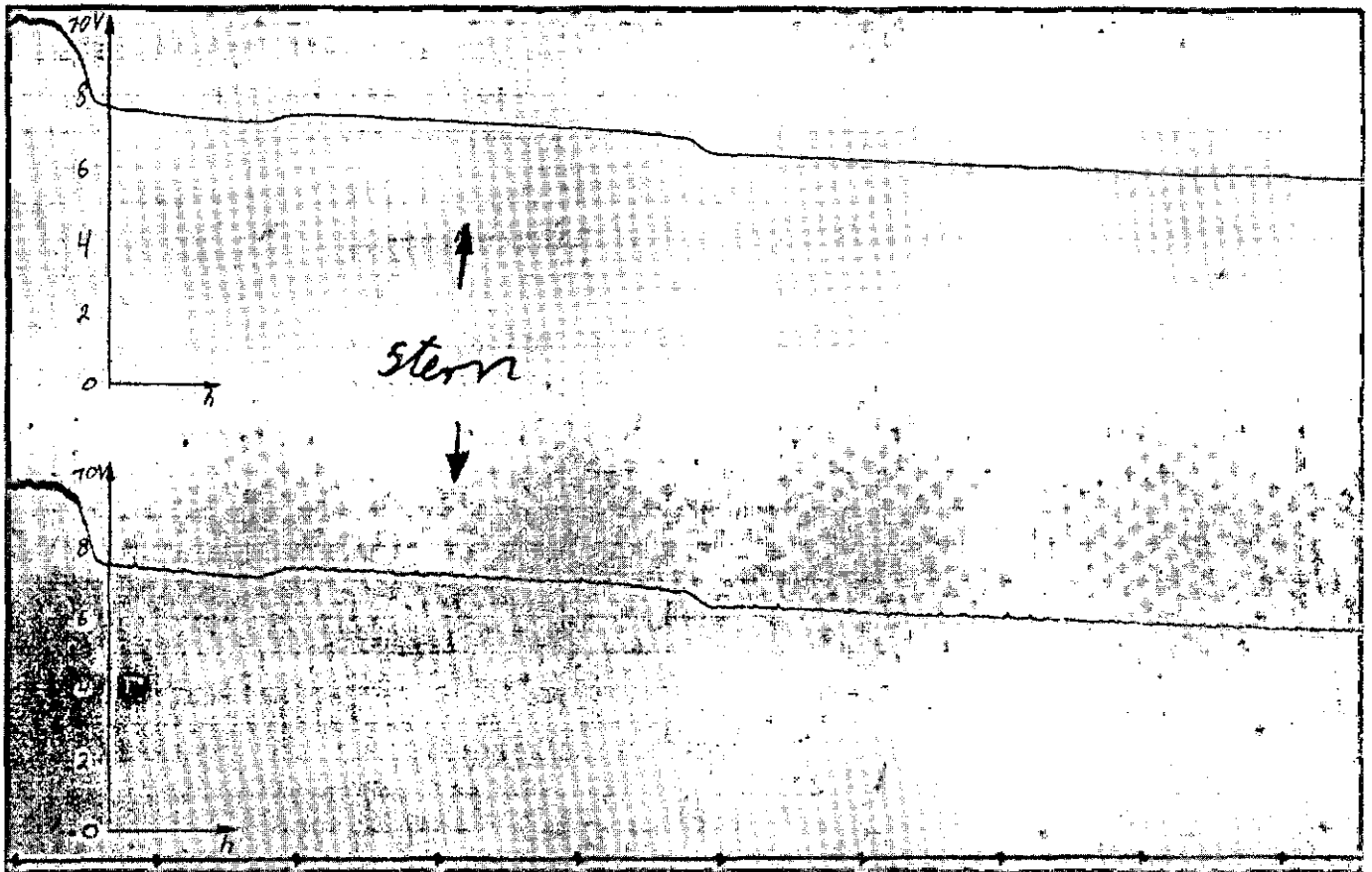


Abb.3.23 Fotometerkurve, aufgenommen in Abisko. F1,F2=Fotometerkanal 1 bzw.2.

Infolge des großen Fotometeröffnungswinkels von 10° ist die Hintergrundhelligkeit sehr groß und das Sternsignal tritt nur wenig hervor. Weiterhin ist noch zu beachten, daß hier keine lineare Anzeige vorliegt, sondern die Verstärkerkennlinie aus Abb.5.5 mit eingeht.

Infolge der zum Zenit hin abnehmenden Helligkeit des Himmels-hintergrundes liegen die Kurven schräg.

4. Messungen mit dem Fotometer

4.1. Allgemeines

Die Expedition nach Abisko begann am 1.3.69. In der ersten Woche wurden die Meßgeräte aufgebaut und getestet. Nachdem an mehreren Abenden der count down infolge schlechter Sichtverhältnisse abgebrochen werden mußte, konnte an vier aufeinanderfolgenden Abenden je eine Rakete abgeschossen werden.

In Abb.4.1 sind die Positionen von Abschuß- und Beobachtungsort sowie die Fußpunkte der Wolken des Sr-Experimentes vom 16.3.69 wiedergegeben. Die wahre Flugbahn der Rakete wich stark von der Nominalbahn ab, wodurch die Beobachtungsbedingungen von Abisko aus ungünstiger wurden (Beobachtungsrichtung nicht mehr senkrecht zur Flugbahnebene).

Verschiedene Wolken zeigten eine große Drift, so daß das Fotometer ständig nachgefahren werden mußte.

10 Sekunden vor dem Erscheinen der nächsten Wolke erfolgte die Einstellung des Fotometers auf ihren vorausberechneten Erscheinungsort.

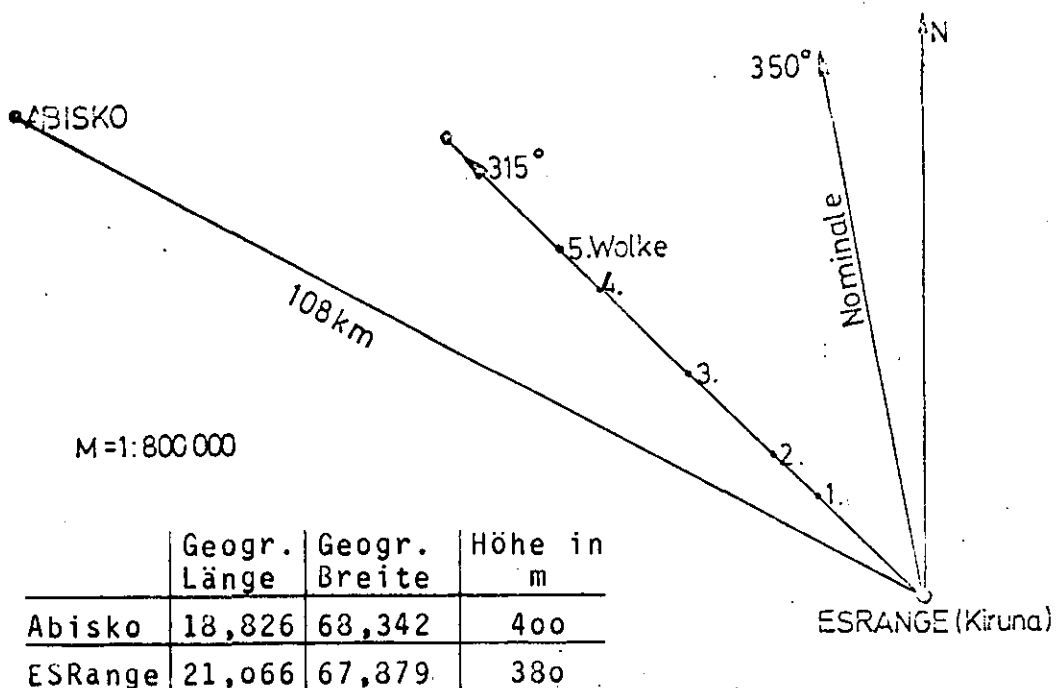


Abb. 4.1 nach Lit.5 Sr-Experiment vom 16.3.69

Vorbereitungen

Nachdem das Fotometer in die Waage gestellt worden war, wurde der Azimutteilkreis mit Hilfe eines geeigneten Sternes eingerichtet. Vor jedem Schuß wurden dann die Positionen der Wolken in Azimut und Elevation auf den Teilkreisen markiert, um eine schnelle Einstellung des Fotometers von einer Wolke zur anderen zu ermöglichen.

Die Einrichtung der automatischen Kleinbildkamera erfolgte in Abisko mit Hilfe einer besonders hellen Straßenlaterne in großer Entfernung, welche von unserem Beobachtungsort aus gut gesehen werden konnte. Mit dem Fotometer wurde die Lampe unter Beobachtung der Anzeige in Azimut und Elevation durchfahren und die Grenzwinkel notiert, bei welchen die Anzeige zurück ging. Dann ließ sich das Fotometer durch Mittelung der gemessenen Winkel mit seiner optischen Achse auf die Lampe ausrichten. In dieser Stellung wurden dann mit der Kleinbildkamera Aufnahmen gemacht, wodurch sich der Mittelpunkt des Fotometergesichtfeldes auf dem Negativformat in Form der abgebildeten Lampe festlegen ließ. Während der Messungen wurde die Kamera in kurzen Zeitabständen ausgelöst.

Eichungen

Unmittelbar nach den Beobachtungen erfolgte eine Relativ-eichung beider Fotometerkanäle mit der unter Punkt 3.4. beschriebenen Eichvorrichtung (Abb. 3-16). Die Eichvorrichtung wird an die Stelle des abschraubbaren Blendensystems gesetzt. Bei laufendem Schreiber werden nun verschiedene Eichpunkte registriert, indem die Standard-Lichtquelle den Fotomultiplier beleuchtet und zwar mit und ohne die verschiedenen Graugläser. Weiterhin wurden noch unter Verwendung eines Impulsgenerators die Verstärkercharakteristiken beider Kanäle auf dem Schreiber registriert. Bei dieser Eichung lag am Eingang des Verstärkers eine negative Sägezahnspannung mit einer Frequenz von ca. 0,35 Hz welche gleichzeitig auf einem Schreiberkanal registriert wurde. Der andere Kanal registrierte den Verstärker-ausgang.

In den folgenden Kapiteln 4.2. und 4.3. sollen die Meßergebnisse des Sr-Experimentes vom 16.3. und des Ba-Experimentes vom 17.3. wiedergegeben werden.

Die Priorität der Auswertungen liegt bei den Sr-Wolken.

4.2. Messungen an Sr-Wolken

Der Start der Rakete vom Typ Nike-Apache erfolgte am 16.3.69 19^h05^m MEZ vom Gelände der ESRange aus (Positionen siehe Abb.4.1). Die Rakete erzeugte 5 Sr-Wolken. Einige Daten dieser Wolken sind in Abb.4.1 zusammengestellt.

Wolken Nr.	Zeit nach Start/s	Höhe der Wolke/km	Abstand Abisko-Wolke/km
1	123	167,5	192,1
2	161	200,5	219,0
3	240	233,3	245,2
4	322	201,1	211,6
5	360	167,1	178,1

Tabelle 4.1

Fotometereinstellungen

$B_1 = 1\text{cm}$, $\alpha = 10^0$ bei beiden Kanälen, U_H siehe Tab.4.4, Kanal 1 (F1): 4608Å Filter, Kanal 2 (F2): ohne Filter, Schreiber: F1 = 2V/cm, F2 = 5V/cm.

Eichungen mit der Standard-Lichtquelle

$U_H = 1100\text{V}$, F1, $B_1 = 4\text{cm}$, 4608Å Filter.

Relative Bestrahlungsstärke	1	0,492	0,117	0,02
Anzeige/Skt.	2,15	1,48	0,51	0,09
Anzeige/V	4,3	2,96	1,02	0,18

Tabelle 4.2

$U_H = 1100\text{V}$, F2, $B_1 = 4\text{cm}$, ohne Filter.

Relative Bestrahlungsstärke	1	0,49	0,12	0,02
Anzeige/Skt.	2,4	2,02	1,3	0,58
Anzeige/V	12,0	10,1	6,5	2,9

Tabelle 4.3

17 ^h 06 ^m	Schreiber + Netzgeräte eingeschaltet. (-11°C)
17 ^h 37 ^m	Stativ in die Waage gestellt und Positionen der Wolken auf den Teilkreisen markiert.
17 ^h 53 ^m	1200V Hochspannung eingeschaltet. (-14,5°C)
18 ^h 32 ^m	Schreiber geeicht (Nullpunkt + Verstärkung). (-15°C)
18 ^h 47 ^m	Fotometer auf Position der 1. Wolke ausgerichtet und Hintergrundmessung begonnen, Schreiber: 1mm/s
18 ^h 51 ^m	Aufladung der Registrierkamera beendet und eine Probeaufnahme gemacht.
18 ^h 56 ^m	Netzspannung kontrolliert und nachgeregelt. Temperaturmessung: F1: SEV - 14°C, Elektronik - 14°C F2: SEV - 14°C, Elektronik - 13,5°C Außentemperatur - 15°C
19 ^h	Hochspannung auf 1000V heruntergestellt, da Hintergrundanzeige sehr groß.
19 ^h 4 ^m	Schreiber auf 5mm/s gestellt.
19 ^h 4 ^m 10 ^s	Interne Zeitimpulse des Schreibers abgeschaltet
19 ^h 5 ^m	Start der Rakete
19 ^h 7 ^m 3 ^s	Beginn der ersten Wolke (Abb.4.2)
19 ^h 7 ^m 15 ^s	Erhöhung der Hochspannung auf 1100V
19 ^h 7 ^m 34 ^s	Einstellung des Fotometers auf die Position der zweiten Wolke
19 ^h 7 ^m 41 ^s	Beginn der zweiten Wolke (Abb.4.3)
19 ^h 9 ^m	Beginn der dritten Wolke (Abb.4.4)
19 ^h 10 ^m 22 ^s	Beginn der vierten Wolke
19 ^h 11 ^m	Beginn der fünften Wolke
19 ^h 27 ^m	Temperaturmessung: F1: SEV - 15°C, Elektronik - 14,5°C F2: SEV - 15°C, Elektronik - 14°C Außentemperatur - 16°C

Tabelle 4.4 Meßprotokoll vom Tonband

Tab.4.4 zeigt eine Niederschrift des auf Tonband gesprochenen Meßprotokolls, indem auch die Temperaturen enthalten sind.

Meßergebnisse

Die Abb.4.2 bis 4.4 geben den gemessenen Verlauf der Bestrahlungsstärke am Ort des Fotometers für die beiden Fotometerkanäle F1 und F2 wieder. Die Darstellungen sind fotografische Verkleinerungen der Schreiberaufzeichnungen (Originalbreite/Kanal=5cm).

Der Sprung in der Kurve aus Abb.4.2 hat seine Ursache im Erhöhen der Hochspannung von 1000V auf 1100V.

Die Kurven werden im Kapitel 5.1. diskutiert.

Kontrollfotos

Die Fotos der Abb.4.5 bis 4.12 sind Kontrollaufnahmen der automatischen Kleinbildkamera. Sie vermitteln gleichzeitig einen Eindruck vom zeitlichen Verlauf des Expansionsvorganges der Wolken. Der Kreis bezeichnet jeweils das Gesichtsfeld des Fotometers. Aufgrund der Bahnabweichungen der Rakete konnten nur die ersten drei Wolken fotometriert werden, denn wie aus Abb.4.11 und 4.12 hervorgeht, überlagern sich die folgenden Wolken.

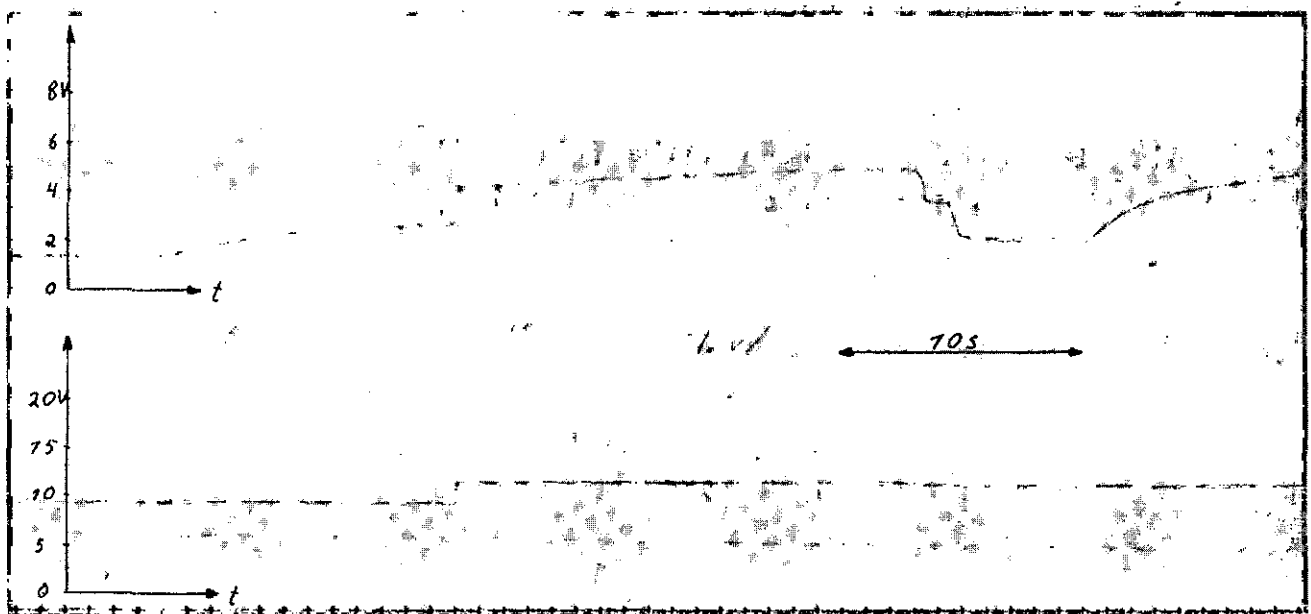


Abb.4.2 Helligkeitsverlauf der 1.Sr-Wolke, oben 4607R, unten ohne Filter.

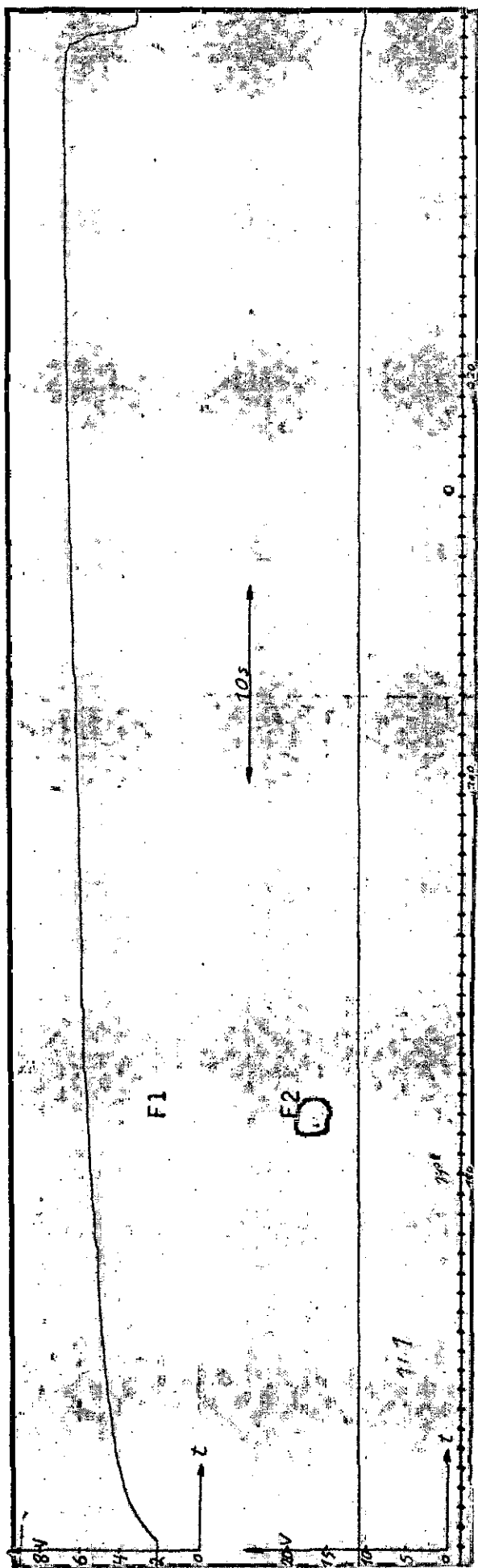


Abb.4.3 Helligkeitsverlauf der 2. Sr-Wolke

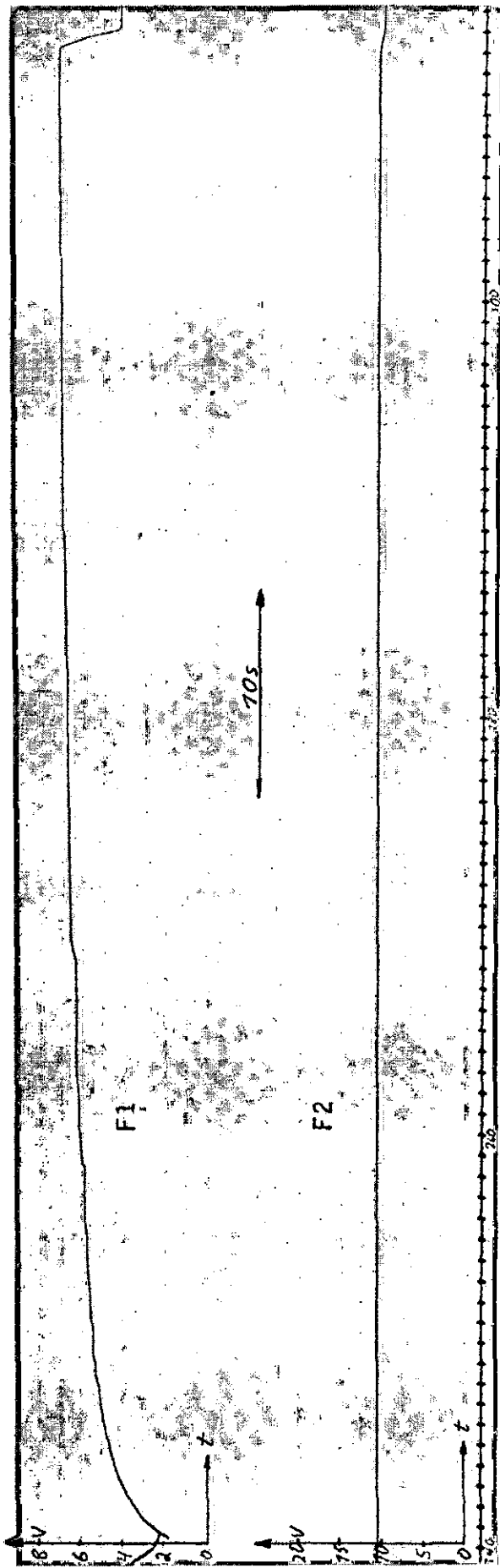


Abb.4.4 Helligkeitsverlauf der 3. Sr-Wolke

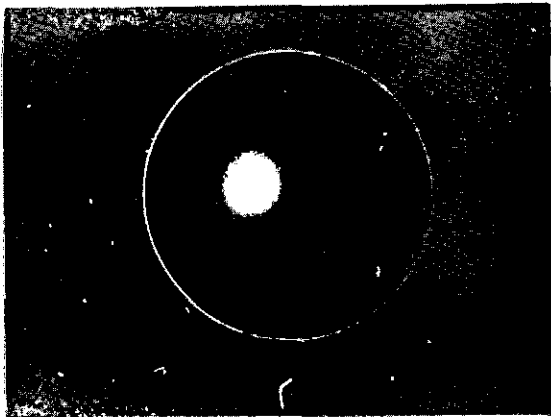


Abb. 4.7 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 100s nach dem Start. Auf-
 nahme mit einem Kamm-Photoelektronenvervielfacher.

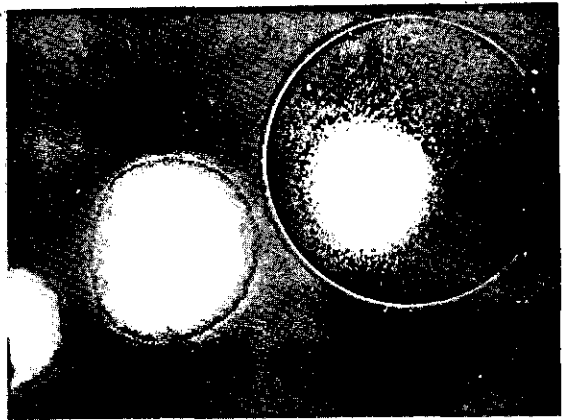


Abb. 4.8 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 70s nach dem Start.

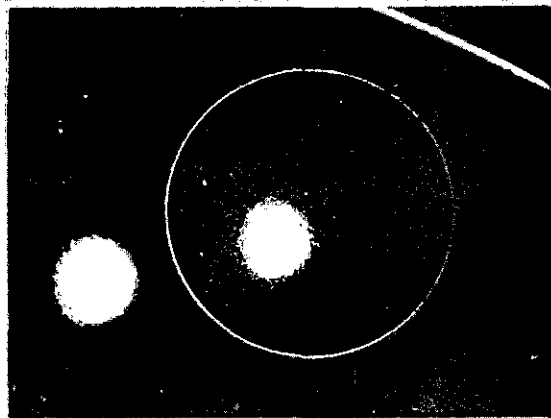


Abb. 4.9 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 72s nach dem Start.



Abb. 4.10 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 281s nach dem Start.

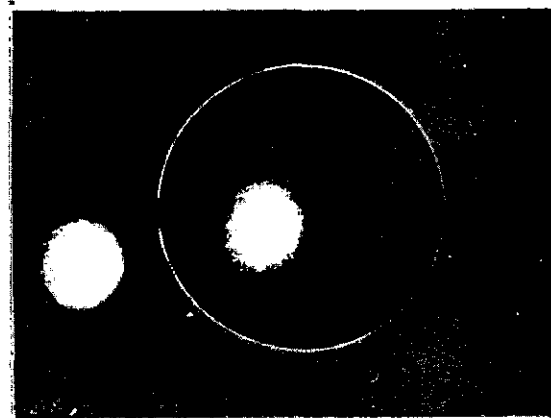


Abb. 4.11 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 41s nach dem Start.

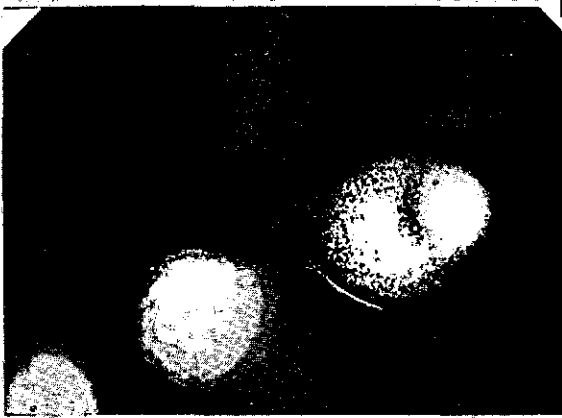


Abb. 4.12 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 146s nach dem Start.



Abb. 4.13 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 100s nach dem Start.

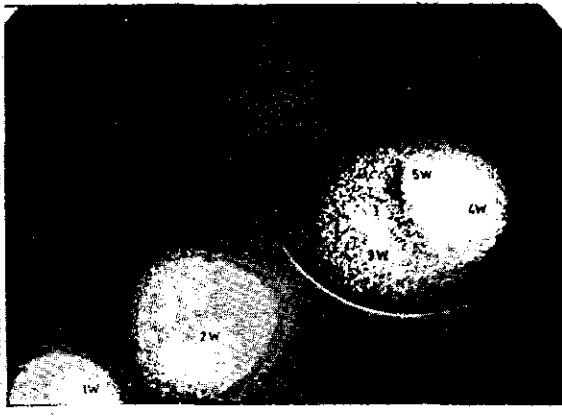


Abb. 4.14 Kontrollaufnahme Sr-Wolke 57s nach dem Start.

4.3. Messungen an Ba-Wolken

Repräsentativ für die drei Experimente mit Ba-Wolken sind im Folgenden Daten und Meßergebnisse für das Experiment vom 17.3.69 wiedergegeben.

Der Start der Rakete (Nike-Apache) erfolgte um 19^h10^m MEZ. Die Rakete erzeugte 3 Ba-Wolken. Einige Daten dieser Wolken sind in Tab. 4.5 zusammengestellt.

Wolken Nr.	Zeit nach Start/s	Höhe der Wolke/km
1	101	140
2	147	170
3	231	225

Tabelle 4.5

Fotometereinstellungen.

$B_1 = 1\text{cm}$, $\alpha = 10^0$ bei beiden Kanälen, $U_H = 1200\text{V}$
 F1: 4608Å Filter, F2: 5535Å Filter,
 Schreiber: 2V/cm auf beiden Kanälen.

Eichungen mit der Standard-Lichtquelle

$U_H = 1200\text{V}$, F1, $B_1 = 4\text{cm}$, 4608Å Filter

Relative Bestrah- lungsstärke	1	0,492	0,117	0,06	0,02
Anzeige/Skt.	2,83	2,03	0,77	0,4	0,1
Spannung/V	5,66	4,06	1,54	0,8	0,2

Tabelle 4.6

$U_H = 1200\text{V}$, F2, $B_1 = 2\text{cm}$, 5543Å Filter

Relative Bestrah- lungsstärke	1	0,491	0,118	0,06	0,02	0,01
Anzeige/Skt.	5,15	4,25	2,47	1,72	1,05	0,6
Spannung/V	10,3	8,5	4,94	3,44	2,1	1,2

Tabelle 4.7

Temperaturen

F1: SEV -14°C , Elektronik $-13,5^{\circ}\text{C}$

F2: SEV $-13,5^{\circ}\text{C}$, Elektronik $-13,5^{\circ}\text{C}$

Außentemperatur -15°C

Meßergebnisse

Die Abb.4.13 bis 4.15 geben den gemessenen Verlauf der Gesamthelligkeit für F1 und F2 wieder. Die Darstellungen sind fotografische Verkleinerungen der Schreiberaufzeichnungen (Originalbreite/Kanal=5cm).

Die Kurven werden in Kap.5.3. diskutiert.

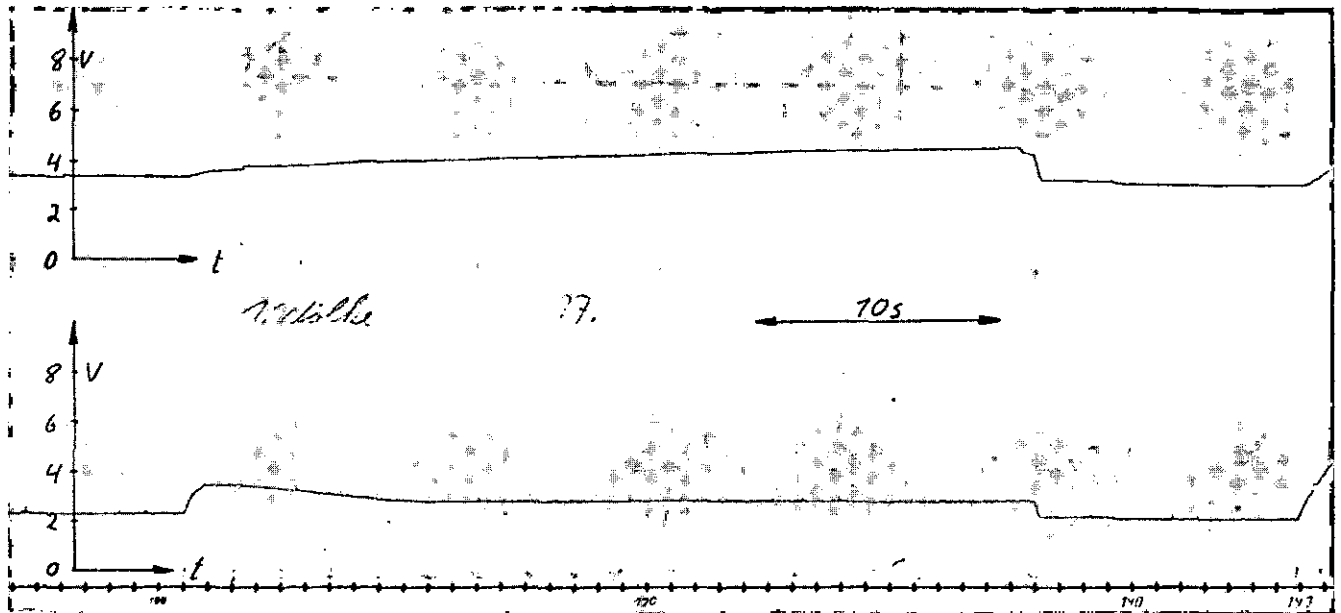


Abb.4.13 Helligkeitsverlauf der 1. Ba-Wolke, oben 4607\AA , unten 5543\AA Filter.



Abb.4.14 Helligkeitsverlauf der 2. Ba-Wolke

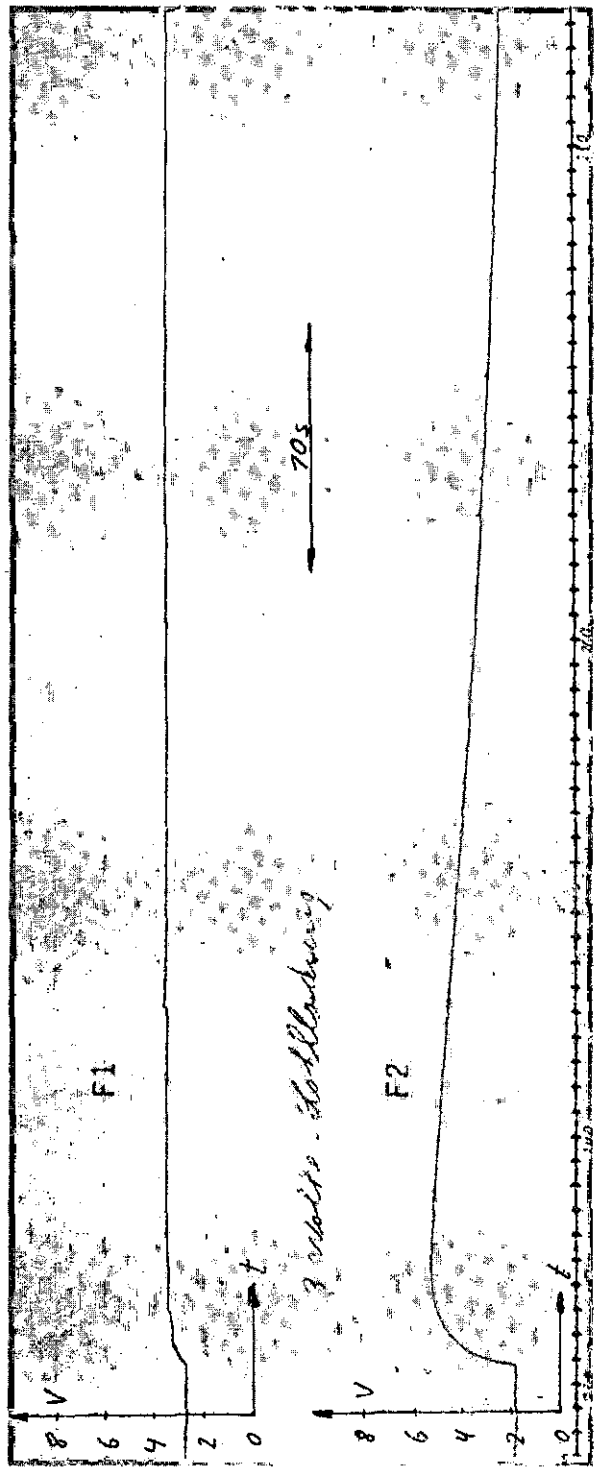


Abb.4.15 Helligkeitsverlauf der 3. Ba-Wolke

5. Auswertung der Meßergebnisse

5.1 Sr-Wolken

In diesem Abschnitt soll die Auswertung der unter 4.2 aufgeführten Meßergebnisse erläutert werden.

Mit dem Kanal 1 (F1) des Fotometers wurde die neutrale Sr-Linie und mit dem Kanal 2 (F2) die integrale Bestrahlungsstärke über den ganzen Empfindlichkeitsbereich der Fotokathode gemessen.

Wie aus den Abb. 4.2 bis 4.4 hervorgeht, war die durch den Nachthimmelshintergrund hervorgerufene integrale Bestrahlungsstärke, so groß, daß die Wolken keinen feststellbaren Beitrag mehr leisten konnten. Daher zeigt F2 keine auswertbaren Helligkeitsänderungen an. Die Auswertung muß sich deshalb auf die mit F1 gemessene 4607\AA - Linie beschränken.

Relativeichung

Die nach der Messung erfolgte Eichung mit der Standard-Lichtquelle ergibt die Zuordnung von relativen Bestrahlungsstärken zu entsprechenden Schreiberausschlägen. Hierbei wurde die Bestrahlungsstärke, welche durch die Standard-Lichtquelle der Eichanordnung hervorgerufen wird, wenn $B_1 = 4\text{cm}$ beträgt und das 4607\AA - Filter eingeschaltet ist, willkürlich gleich $1/16$ relative Einheiten gesetzt. Kleinere Bestrahlungsstärken wurden durch Zwischenschaltung von Graugläsern erreicht.

Der Relativwert $1/16$ wurde gewählt, damit bei den mit $B_1 = 1\text{cm}$ vorgenommenen Messungen die Bestrahlungsstärke, bei gleicher Anzahl von Elektronen an der Fotokathode, der relativen Bestrahlungsstärke 1 bei der Messung entspricht. Die relativen Bestrahlungsstärken E_{rel} in den Eichtabellen Tab. 4.2 und 4.6 sind bereits in der genannten Weise umgerechnet worden.

Während der Messung wurde die Hochspannung von 1000V auf 1100V heraufgesetzt (siehe Abb.4.2). Um den Teil der Messung, welcher mit $U_H = 1000V$ durchgeführt worden ist umzeichnen zu können erfolgte eine Nacheichung von F1 im Labor, da aus Abisko nur Eichungen für $U_H = 1100V$ vorlagen. Diese Eichung wurde mit Hilfe der Standard-Lichtquelle bei einer Temperatur von $-15^{\circ}C$ in einer Kühltruhe vorgenommen. Der apparative Aufbau war der gleiche wie in Abisko. Zunächst wurde bei $U_H = 1100V$ der in Abisko gemessene Wert eingestellt und dann der Ausschlag bei $U_H = 1000V$ gemessen. In Abb.5.1 sind die beiden Eichkurven für F1 bei 1000 und 1100V wiedergegeben.

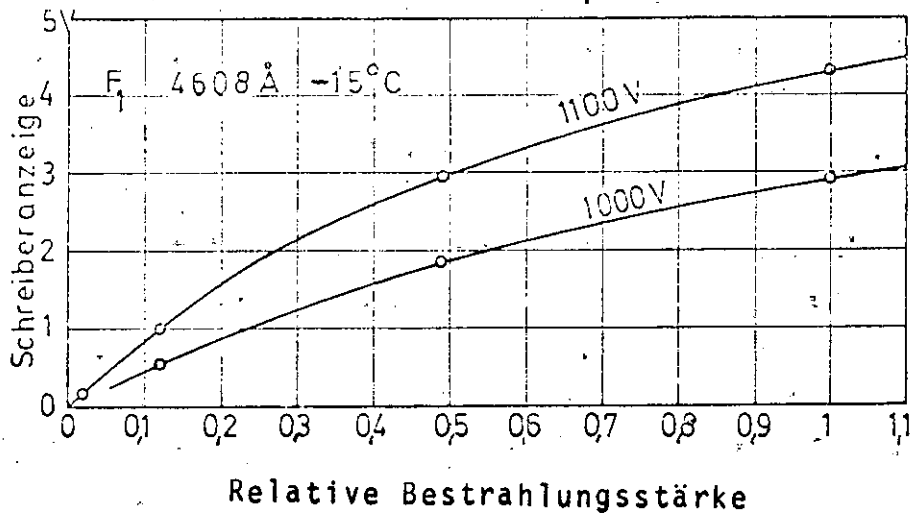


Abb.5.1 Eichdiagramm

Wie aus Abb.5.1 und 4.2 ersichtlich, existieren für alle bei $U_H = 1000V$ gemessenen Werte entsprechende Größen der relativen Bestrahlungsstärke gemäß der Eichkurve. Die in den Abb.4.2 bis 4.4 wiedergegebenen Meßwerte bei $U_H = 1100V$ erreichen eine Schreiberanzeige von ca. 7,5V. Zu diesen Spannungen erscheinen in Abb.5.1 keine relativen Bestrahlungsstärken, da die Standard-Lichtquelle nicht hell genug war um Eichpunkte im Bereich dieser hohen Bestrahlungsstärken zu liefern, obwohl die Blende B_1 bis auf ihren größten Wert geöffnet wurde.

Um die Meßergebnisse bis zu hohen Bestrahlungsstärken hin auswerten zu können, ist es daher erforderlich, nachträglich eine Erweiterung der Eichkurve $U_H = 1100V$ zu höheren Bestrahlungsstärken hin vorzunehmen.

Eine Möglichkeit, den Strahlungsfluß und so auch die Bestrahlungsstärke zu erhöhen besteht darin, das Filter aus dem Strahlengang zu entfernen. Von dieser Möglichkeit wurde Gebrauch gemacht, um eine Nacheichung zu höheren Bestrahlungsstärken hin vorzunehmen.

Mit Hilfe der Standard-Lichtquelle und eines Grauglases von 49,2% Durchlässigkeit wurde auf dem Schreiber eine Anzeige hervorgerufen, welche bei der Eichung in Abisko der rel. Bestrahlungsstärke 1 entsprach. Das Filter war nicht eingeschaltet. Eine Variation der Bestrahlungsstärke, zwecks Einstellung des Wertes aus Abisko, wurde dadurch erreicht, daß der Absperrschieber am Lichtquellengehäuse (Abb.3.16) mehr oder weniger weit herausgezogen wurde. Nach dieser Einstellung wurde das Grauglas herausgenommen und erneut gemessen. Auf diese Weise entstand ein Eichpunkt bei der rel. Bestrahlungsstärke $1/0,492 = 2,03$. Durch Wiederholung dieses Verfahrens, mit dem Ausgangspunkt der rel. Bestrahlungsstärke von 2,03, konnte ein weiterer Eichpunkt ermittelt werden.

Unter Verwendung dieser beiden Eichpunkte (durch Sterne gekennzeichnet) und den Eichpunkten aus Abisko wurde die Kurve in Abb.5.2 gezeichnet.

Da die Linearitätseigenschaften eines Fotomultipliers wellenlängenabhängig sein können, bestand die Befürchtung, daß die auf die geschilderte Weise gewonnenen Eichpunkte einen Fehler besitzen, da die Nacheichung im Gegensatz zu den Messungen auf der Expedition ohne das Filter erfolgte. Die unter Verwendung des Interferenzfilters durchgeführten Messungen beschränken sich auf einen Wellenlängenbereich von ca. 48\AA , entsprechend der Filterhalbwertsbreite, während ohne Filter der gesamte Empfindlichkeitsbereich der Fotokathode von ca. 3000\AA Breite angesprochen wurde.

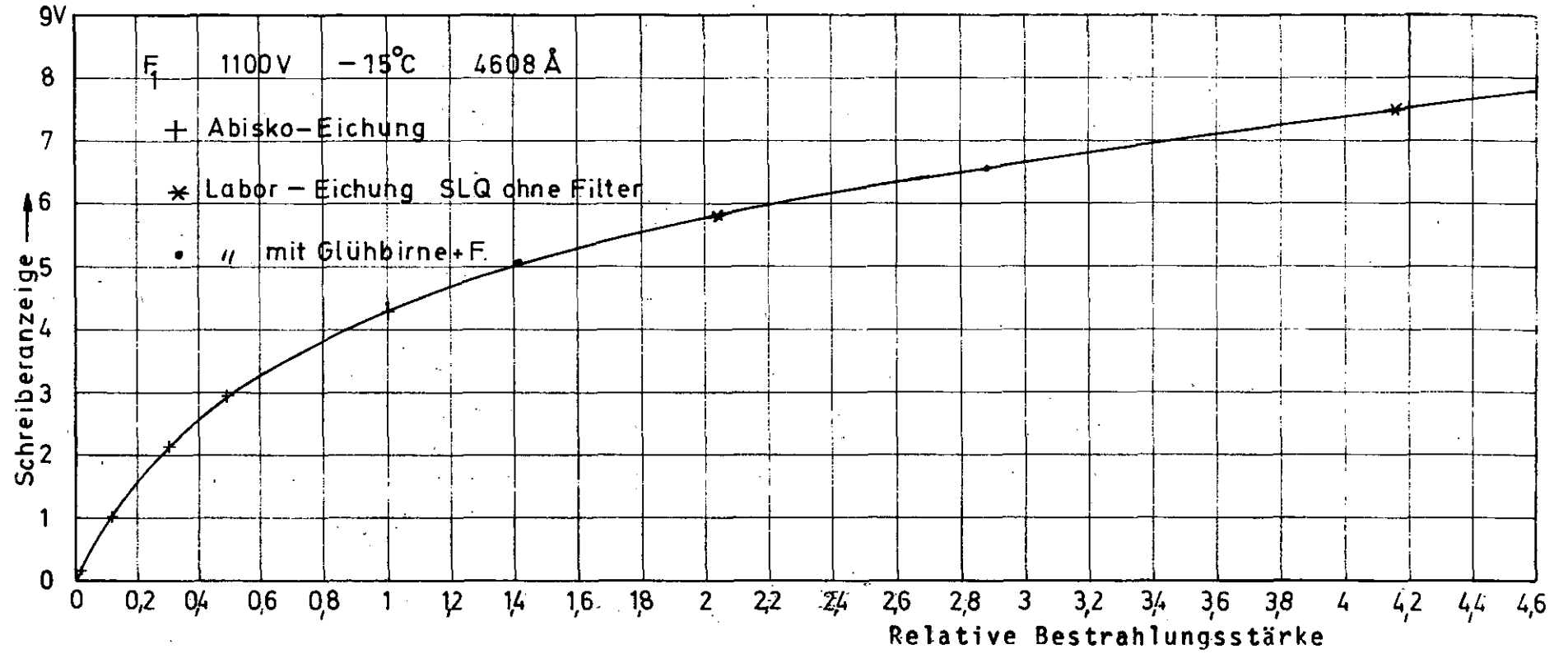


Abb. 5.2 Erweitertes Eichdiagramm

Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurde an Stelle der Standard-Lichtquelle eine hinreichend helle Glühbirne eingesetzt, welche über einen regelbaren Gleichspannungskonstanter betrieben wurde. Auf diese Weise konnte die Eichung für große Bestrahlungsstärken in dem engen Wellenlängeninterwall von 48\AA durchgeführt werden.

Die Eichung erfolgte ähnlich wie vorher beschrieben, nur wurde diesmal von dem vorhandenen Eichpunkt für die rel. Bestrahlungsstärke 0,492 ausgegangen und zwar unter Zwischenschaltung des Grauglases mit 2% Durchlässigkeit. Der erste Eichpunkt wurde unter Verwendung von 2 Graugläsern mit zusammen 5,75% Durchlässigkeit erreicht und der nächste Punkt mit dem Grauglas von 11,7% Durchlässigkeit.

Diese beiden neuen Meßpunkte sind in Abb.5.2 als Punkte eingezeichnet. Sie liegen ebenfalls auf der vorher gezeichneten Kurve. Die oben geäußerte Befürchtung ist somit im Rahmen der hier realisierbaren Meßgenauigkeit unbegründet.

Eine genauere Begründung befindet sich in Kap.6.3.

Auswertungen

Mit Hilfe von Abb.5.1 und 5.2 lassen sich die gemessenen Kurven (Abb.4.2 bis 4.4) umzeichnen, so daß die relative Bestrahlungsstärke am Ort des Fotometers als Funktion der Zeit angegeben werden kann (Abb.5.3). Die entsprechenden Kurven (Abb.5.3) geben nur die durch die betreffenden Wolken hervorgerufene Bestrahlungsstärke wieder. Der Beitrag des Nachthimmelshintergrundes ist bereits abgezogen worden.

Die Werte der relativen Bestrahlungsstärke für die einzelnen Wolken bedürfen noch der Reduktion auf eine einheitliche Entfernung, da die Wolken in verschiedenen Entfernungen vom Beobachter entstanden sind (Tab.4.1).

In Abb.5.4 ist die zeitliche Abhängigkeit der Wolkenhelligkeit unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Entfernungen eingezeichnet. Als Referenzentfernung wurde die der zweiten Wolke mit 219,0km zu Grunde gelegt.

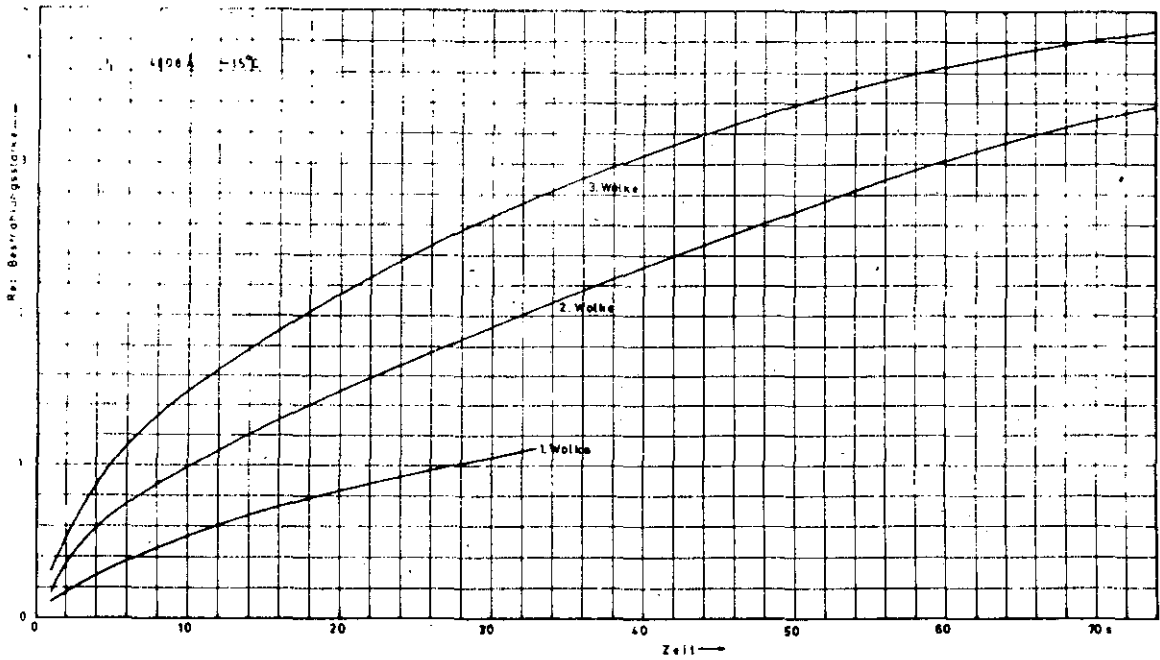


Abb.5.3 Verlauf der relativen Bestrahlungsstärke als Funktion der Zeit für die Sr-Wolken.

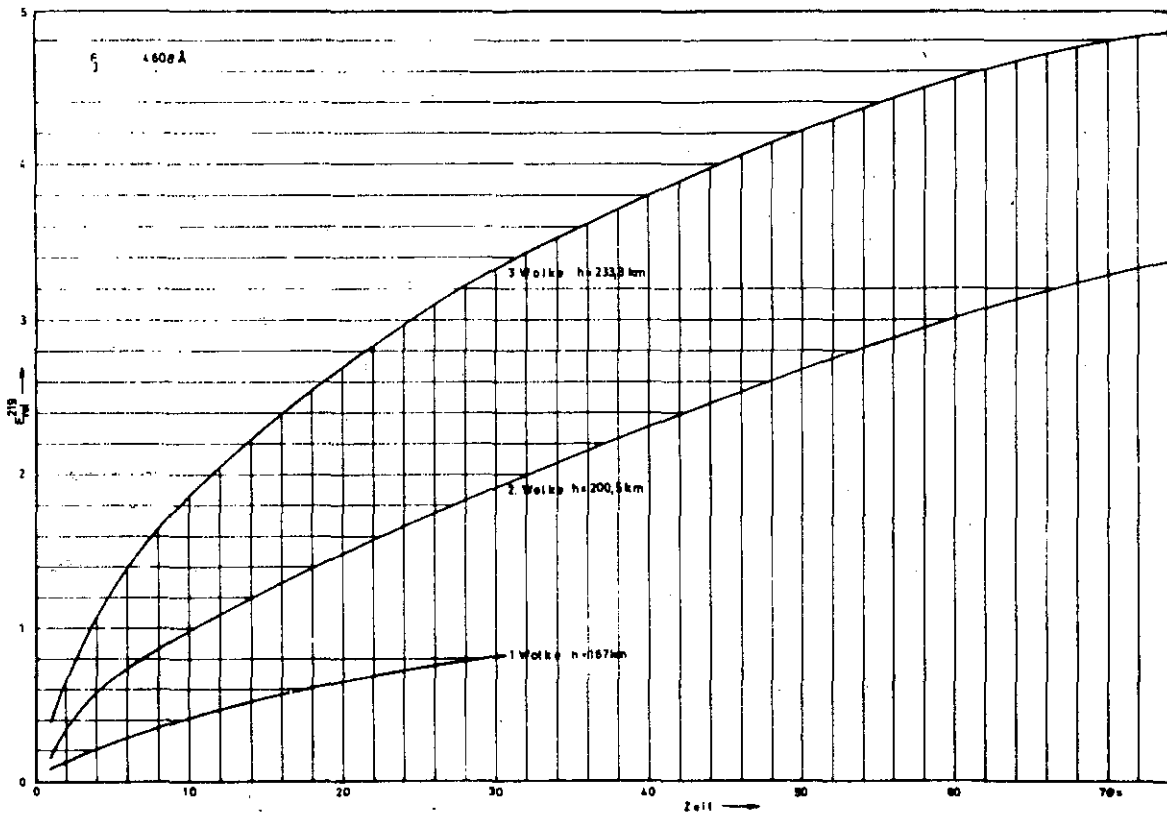


Abb.5.4 Verlauf der relativen Bestrahlungsstärke als Funktion der Zeit für die Sr-Wolken, nach der Reduktion auf eine gemeinsame Entfernung (219km).

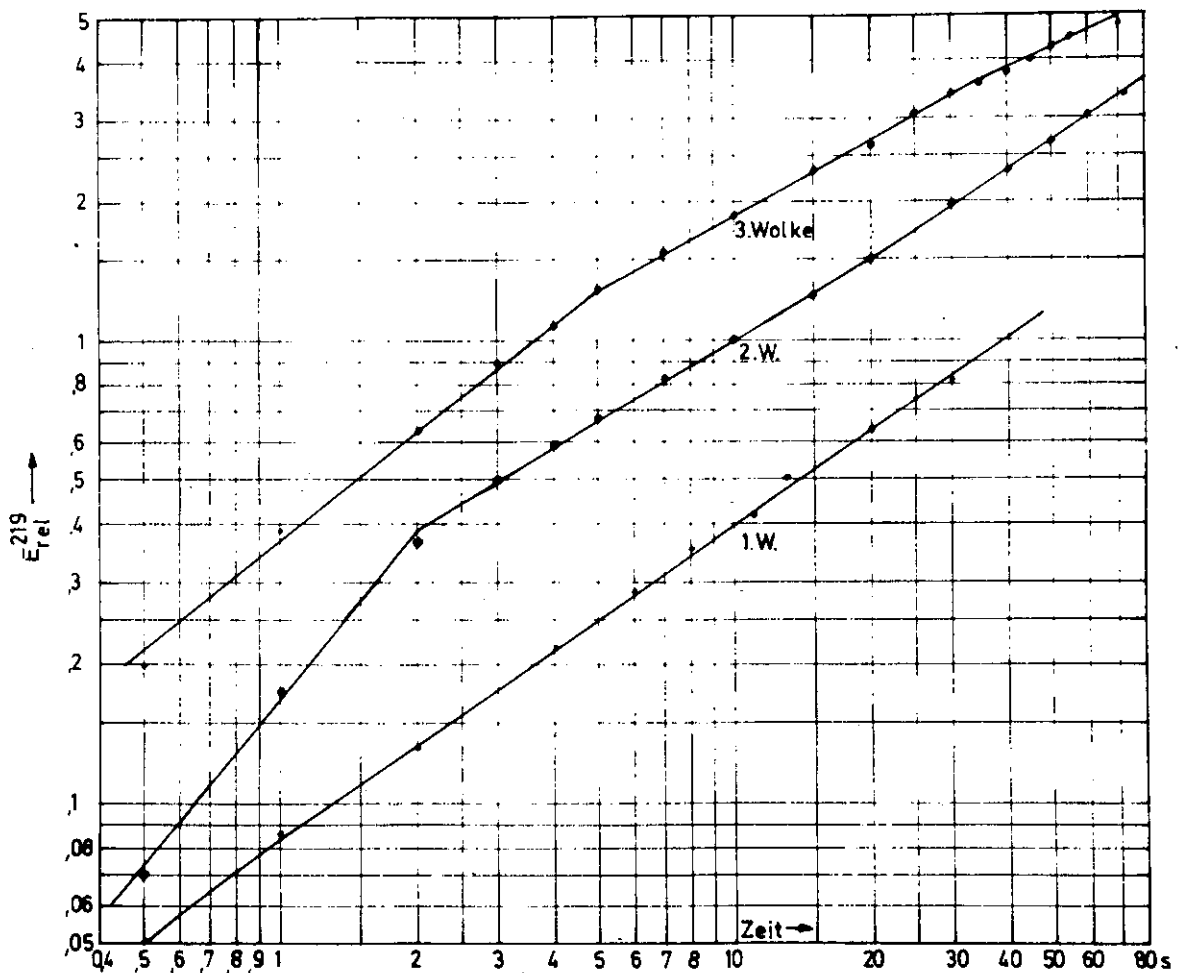


Abb.5.5 Verlauf der reduzierten relativen Bestrahlungsstärken als Funktion der Zeit.

In Abb.5.5 sind die selben Werte wie in Abb.5.4 aufgetragen jedoch im doppelt logarithmischen Maßstab. Hier zeigt sich, daß die meisten Kurventeile durch eine Gerade wiedergegeben werden können. Weiterhin fällt auf, daß die Kurven am Anfang eine größere Steigung besitzen und dann zum Teil recht schnell (Knick) in eine Gerade münden. Diese ersten erkennbaren Übergangsstellen liegen bei folgenden Zeiten:

1. Wolke	2. Wolke	3. Wolke
≈1s	2s	5s

Nach [10] kann man die Ausbreitung der Wolken in zwei Abschnitte einteilen. 1. die Phase der freien Expansion mit großen Radialgeschwindigkeiten der Atome und 2. die Diffusionsphase bei welcher das Strontium mit den umgebenden Gasen im thermischen Gleichgewicht steht. Durch die hohen Radial-

geschwindigkeiten der ersten Phase ist die Wolke optisch dünner, da infolge der Doppler-Verschiebung Strahlung, welche in den hinteren Teilen der Wolke emittiert wird, vorn nicht mehr absorbiert werden kann. Wenn die Wolke in die zweite Phase kommt, tritt dieser Effekt zurück und die Wolke wird optisch dicker. Die Knickstellen markieren etwa den Übergangsbereich von der ersten zur zweiten Phase.

Die geraden Stücke in Abb.5.5 gehorchen folgender Gleichung

$$\lg E_{rel}^{219} = a + b \lg t \quad (5.1)$$

t = Zeit

Die Konstanten a und b lassen sich aus Abb.5.5 für die einzelnen Geradenstücke bestimmen. Durch Umschreibung erhält man aus Gl.5.1

$$E_{rel}^{219} = c t^b, \quad (5.2)$$

mit $c = 10^a$.

Im Einzelnen findet man:

	1.Wolke		2.Wolke		3.Wolke	
t/s	1-30	3-20	20-70	1-5	5-35	35-70
c	0,087	0,268	0,228	0,364	0,531	0,718
b	0,664	0,572	0,628	0,78	0,53	0,459

5.2 Genauigkeit der Sr-Messung

Die Registriereinrichtung

Einen wesentlichen Einfluß auf die Meßgenauigkeit hat die Registriereinrichtung, d.h. der Schreiber. Da das Registrierpapier bei dem verwendeten Schreiber keine seitliche Führung besaß, konnten während des Betriebes mechanische Nullpunktverschiebungen auftreten. Während der Messungen in Abisko wurden Nullpunktverschiebungen von ca. $\pm 0,3\text{mm}$ beobachtet. Das entspricht bei F1 einer Spannung von $\pm 0,06\text{V}$. Bei der logarithmischen Anzeige entspricht dieser Unsicherheit der Spannung eine unterschiedliche absolute Unsicherheit von E_{rel} , je

nachdem in welchem Bereich der Bestrahlungsstärke man sich befindet.

Zusätzlich zu dieser Nullpunktsunsicherheit kommt noch die Unsicherheit, welche durch die Strichstärke des Schreibers hervorgerufen wird, sie beträgt ca. $\pm 0,2\text{mm}$ entsprechend $\pm 0,04\text{V}$

Vom Hersteller des Schreibers werden folgende Angaben gemacht:

Drift: max. $0,25\text{mm}/10^{\circ}\text{C}$ im Bereich von $0-40^{\circ}\text{C}$.

Verstärkerstabilität besser als 1% zwischen 0 und 40°C .

Nichtlinearität: max. $0,25\text{mm}$.

Aus den Temperaturschwankungen am Schreiber von ca. 2°C ergibt sich eine Unsicherheit von $\pm 0,05\text{mm}$ entsprechend $\pm 0,01\text{V}$.

Die Verstärkerstabilitätsunsicherheit bezogen auf den Skalenendwert ergibt $\pm 0,5\text{mm}$ entsprechend $\pm 0,1\text{V}$.

Eventuelle Nichtlinearitäten spielen keine Rolle, da durch die nachfolgende Relativeichung der lineare Beleuchtungsstärkenmaßstab festgelegt wird.

Durch Addition der einzelnen aufgeführten Unsicherheiten, ohne Berücksichtigung der Verstärkerunsicherheit, welche weiter unten betrachtet wird ergibt sich als gesamte Unsicherheit $\pm 0,11\text{V}$.

Aus Abb.3.15 geht hervor, daß die Verstärkercharakteristik im Bereich der Messungen in Abisko etwa einen logarithmischen Verlauf hat. Man kann also schreiben,

$$U = a + \log_b(-U_E) \quad -0,05\text{V} > U_E > -0,5\text{V} ,$$

mit U =Ausgangsspannung und U_E =Eingangsspannung des Verstärkers. Daraus folgt,

$$U = e + C \ln E_{rel} \quad (5.3)$$

wenn $-U_E \sim E_{rel}$ und $C=1/\ln b$. Weiterhin gilt,

$$C = dU/d \ln E_{rel} \quad (5.4)$$

$$\text{oder auch} \quad C = (U_1 - U_2) / (\ln E_{rel1} - \ln E_{rel2}) \quad (5.5)$$

Wenn man die Werte für U und E_{rel} aus Abb.5.2 entnimmt, ergibt sich $C = 1,98$.

Aus Gl.5.3 folgt weiter,

$$dU = C dE_{rel}/E_{rel}, \quad (5.6)$$

oder auch $\Delta E_{rel}/E_{rel} = \Delta U/C . \quad (5.7)$

Aus Gl.5.7 kann man entnehmen, daß die absolute Unsicherheit von U proportional der relativen Unsicherheit von E_{rel} ist. Wenn man die aufgeführten Werte in Gl.5.7 einsetzt ergibt sich, $\Delta E_{rel}/E_{rel} = 5,5\%$. Da die Verstärkerkennlinie im Bereich der Messungen in Abisko nicht genau logarithmisch verläuft, ergeben sich Abweichungen von dem oben berechneten Wert für $\Delta E_{rel}/E_{rel}$. Zu den größten E_{rel} -Werten hin sinkt der Fehler auf etwa 4,5% und zu den kleinsten Werten steigt er auf ca.6,5%.

Die Unsicherheit in der Verstärkerstabilität des Schreibers beträgt 1%. Für die Kurven der Wolken gemäß Abb.4.2-4.4 bedeutet das im unteren Bereich, also in Höhe der Hintergrundanzeige eine absolute Unsicherheit von $\Delta U = 0,02V$ und bei der maximalen Bestrahlungsstärke $\Delta U = 0,074V$. Wenn man diese absoluten Fehler zu den vorher diskutierten addiert, ergibt sich eine relative Unsicherheit von

$$\Delta E_{rel}/E_{ref} \approx 8\%$$

Über den ganzen Bereich der Anzeige, da die vorher aufgeführte Tendenz der steigenden relativen Unsicherheit mit Zunahme der Bestrahlungsstärke durch die relative Unsicherheit in der Verstärkerstabilität kompensiert wird.

Das Interferenzfilter

Die in Abb.3.19 dargestellten Durchlässigkeitskurven für die benutzten Interferenzfilter gelten nur, wenn das Licht senkrecht einfällt. Bei schrägem Lichteinfall verschieben sich die Maxima zu kürzeren Wellenlängen hin [9]. Bei dem benutzten Öffnungswinkel von 10° kann das Licht während der Messungen bis zu 5° schräg einfallen, wodurch sich die Spektrallinie vom Maximum der Filterdurchlässigkeit in die Flügel der Kurve verschiebt, d.h. die Empfindlichkeit des Fotometers verkleinert sich zum Rand des Gesichtsfeldes hin. Auf Grund dieser Tatsache erscheinen in den registrierten

Kurven (Abb.4.2 bis 4.4) an einigen Stellen Sprünge, oder teilweise auch Wellig, welche dadurch hervorgerufen wurden, daß sich beim Nachführen des Fotometers der Einfallswinkel der Strahlung änderte. Da eine Nachführung im allgemeinen die Wolke vom Gesichtsfeldrand zur empfindlicheren Mitte hin bringt, wird eine höhere Bestrahlungsstärke angezeigt. Um die Größe dieser Veränderung abschätzen zu können, wurden für einen Sprung in Abb.4.4 folgende Daten ermittelt: $U = 6,5V$, $\Delta U = 0,2V$, $\approx 3\%$. Diesen Werten entspricht gemäß Abb.5.2, $E_{rel} = 2,8$, $\Delta E_{rel} = 0,25$, $\approx 9\%$. Aus den Fotos in den Abb.4.5 bis 4.10 geht hervor, daß sich die einzelnen Wolken nur wenig aus einem bestimmten Teil des Sichtfeldes entfernt haben, d.h. beim Nachführen sind im wesentlichen nur Schwankungen um eine für die drei Wolken verschiedene Mittellage ausgeführt worden. Infolgedessen kann man annehmen, daß sich diese Fehler bei der Kurve für eine bestimmte Wolke herausgemittelt haben, zumal hierauf bei der Umzeichnung besonders geachtet wurde (grafischer Ausgleich der Sprünge).

Da die fotometrierten Wolken sehr nahe beieinander gestanden haben (Abb.4.10), so muß zugestanden werden, daß in manchen Fällen auch Oberstrahlungen durch die vorhergehende Wolke möglich gewesen sind und zwar insbesondere wenn die Wolken schon eine große Ausdehnung hatten. Infolgedessen ist es wahrscheinlich, daß sich die vorher berechnete sprunghafte Zunahme der Bestrahlungsstärke um 9% aus zwei Komponenten zusammensetzt. Wenn eine Nachführung des Fotometers in dem Sinne erfolgt ist, daß die Wolke mehr zur Gesichtsfeldmitte hin verschoben wurde, dann erhöhte sich neben der Empfindlichkeit des Fotometers auch gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit dafür, Licht von der vorhergegangenen Wolke mit ins Fotometer zu bekommen (siehe Abb.4.10). Diese Annahme wird noch dadurch unterstützt, daß die sprunghaften Veränderungen in der Kurve der dritten Wolke zu späten Zeiten besonders groß sind. Bei der Beurteilung ob ein Sprung groß oder klein ist, muß berücksichtigt werden, daß die Kurven in den Abb.4.2 bis 4.4 im logarithmischen Maßstab aufgetragen sind.

Die Fotokathode

Die Fotokathode eines Fotomultipliers hat im allgemeinen keine konstante Empfindlichkeit über die ganze Fläche. Diese Unterschiede können bei konstantem Strahlungsfluß dazu führen, daß die Anzeige sich ändert, je nachdem mit welcher Blende vor der Kathode gemessen wird.

Aus diesem Grunde ist es wichtig zu wissen, daß alle Messungen, bis auf die vom 15.3., mit der selben Blende $B_1=1\text{cm}$ Durchmesser gemacht wurden. Demgegenüber sind die Eichungen bei einer Blende $B_1=4\text{cm}$ durchgeführt worden. Dieser Unterschied in B_1 für die Messung und die Eichung ist hier ohne Belang, da es sich um eine Relativeichung handelt und infolgedessen die Änderungen in der absoluten Größe der Empfindlichkeit nicht eingehen (Vgl. 6.3.). Wenn allerdings das Nichtlinearitätsverhalten des Fotomultipliers davon abhängt, an welcher Stelle der Fotokathode das Licht eingestrahlt wird, dann läßt sich die Eichung nur unter Vorbehalt auf die Messung anwenden. Im vorliegenden Fall deutet jedoch nichts auf ein solches Verhalten hin.

5.3. Ba-Wolken

Insgesamt sind in Abisko 3 Raketen beobachtet worden, welche Ba-Wolken erzeugten. Hier soll jedoch nur die Auswertung der Meßergebnisse aus Kap.4.3. beschrieben werden. Es wurde mit den beiden Kanälen des Fotometers beobachtet und zwar im Licht der SrI-Linie (F1) und der BaI-Linie (F2).

Relativeichung

Aus den in Abisko vorgenommenen Eichungen gemäß Tab.4.7 und 4.6 lassen sich wie unter 5.1. die Eichkurven zeichnen (Abb.5.6 u.5.7). In Abb.5.6 ist die Eichkurve für F1 wiedergegeben. Da die Eichung mit $B_1=4\text{cm}$ durchgeführt wurde und die Messung mit $B_1=1\text{cm}$, genau wie bei den Sr-Wolken, entspricht die E_{rel} -Skala der Skala für die Sr-Wolken. Die Außentemperaturen waren praktisch gleich, so daß keine Korrektur bezüglich der temperatur-

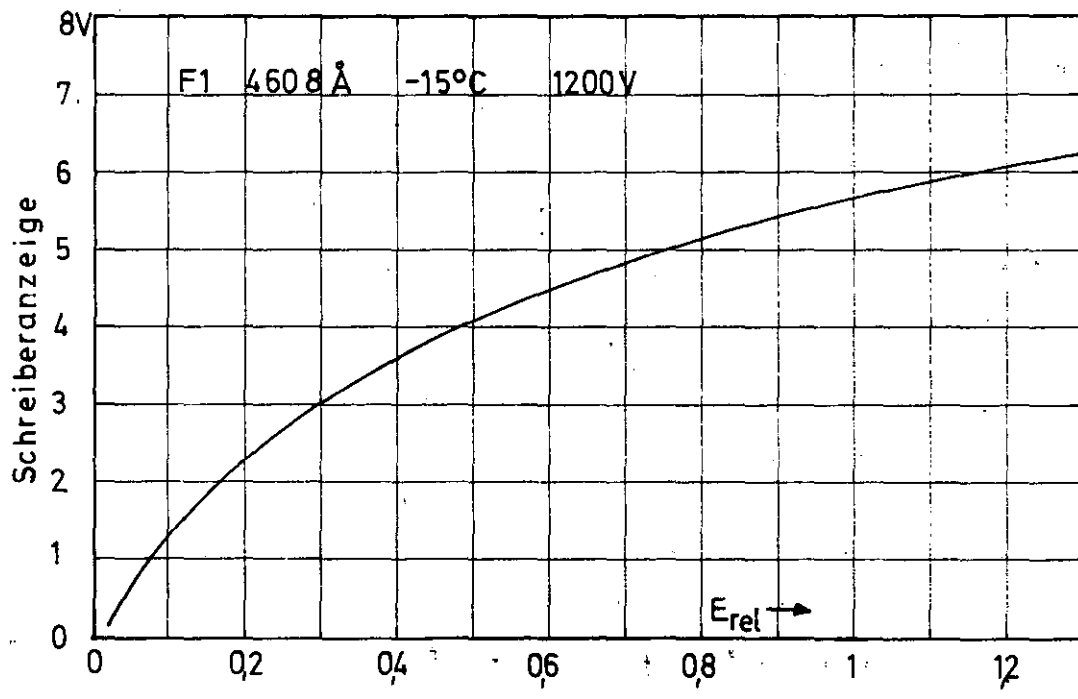


Abb. 5.6 Eichdiagramm für die SrI-Linie

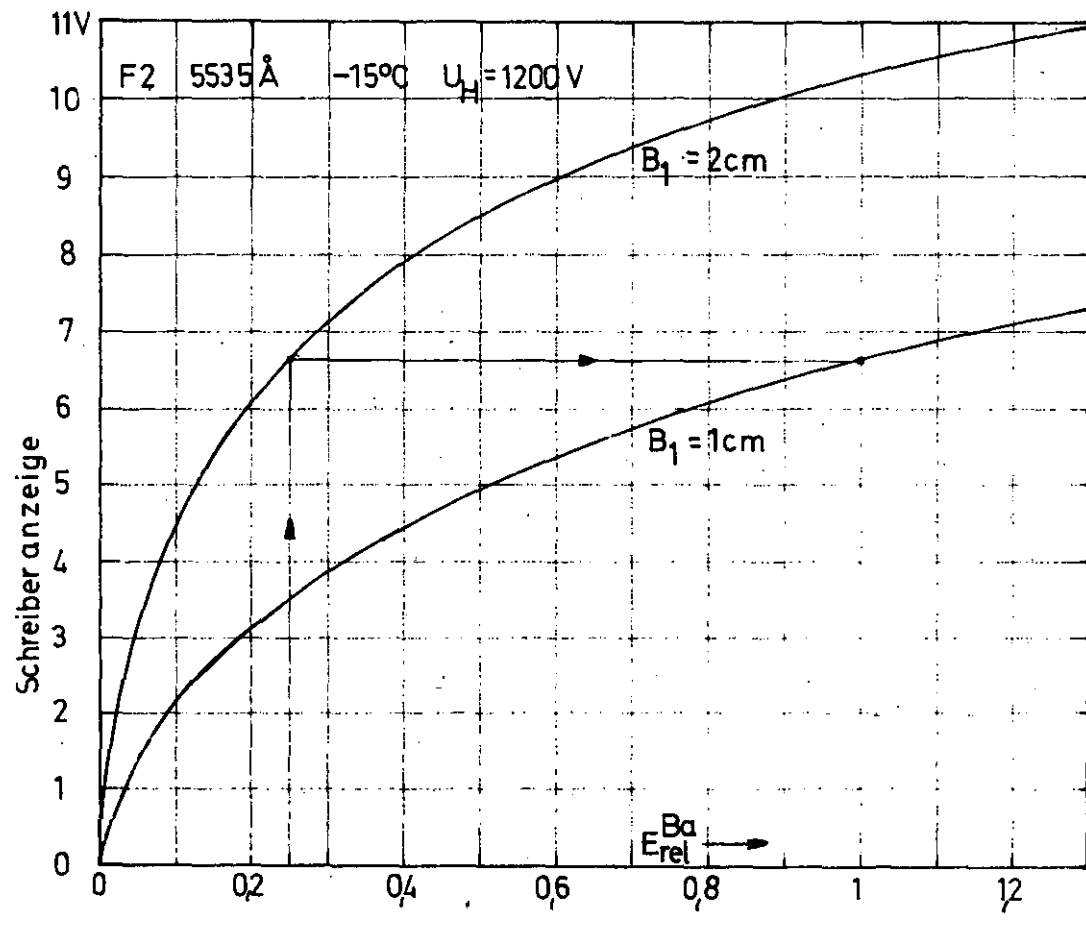


Abb. 5.7 Eichdiagramm für die BaI-Linie

abhängigen Helligkeit der Standard-Lichtquelle erforderlich ist. Gegenüber der Hochspannung von 1100V bei den Sr-Wolken wurde hier mit 1200V gearbeitet, d.h. das Fotometer war empfindlicher, wie ein Vergleich der Abb.5.1 mit 5.6 erkennen läßt. Die Eichkurve Abb.5.6 reicht zur Umzeichnung der Sr-Kurven aus; in diesem Fall braucht keine Nacheichung vorgenommen zu werden.

In Abb.5.7 sind die Eichkurven für F2 wiedergegeben. Die Eichung ist in Abisko mit $B_1=2\text{cm}$ vorgenommen worden und die Messung mit $B_1=1\text{cm}$. Da die anderen Eichungen stets mit $B_1=1\text{cm}$ erfolgten, wurden die Ergebnisse dieser Eichung auf $B_1=1\text{cm}$ reduziert. Die Umzeichnung der $B_1=2\text{cm}$ -Kurve in die für $B_1=1\text{cm}$ erfolgte unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Schreiberspannung U eine Funktion des Strahlungsflusses ϕ ist und das ϕ bei konstanter Beleuchtungsstärke E um den Faktor 4 reduziert wird, wenn statt $B_1=2\text{cm}$ mit $B_1=1\text{cm}$ gemessen wird.

Auswertungen

Unter Anwendung der Eichung auf die Messung (Abb.4.13 bis 4.15) wurden die Kurven in Abb.5.8 ermittelt, sie gelten für die 1. 2.u.3.Wolke, gemessen im SrI-Licht.

Die bis hierher beschriebenen Auswertungen betrafen den Verlauf der Bestrahlungsstärke, welche durch die Sr-Verunreinigungen des Bariums hervorgerufen wurde. Wenn man die Eichkurve Abb.5.7 auf die Meßkurven Abb.4.13 bis 4.15 anwendet, erhält man für den Verlauf der Bestrahlungsstärke, welche durch das BaI hervorgerufen wurde, die in Abb.5.9 dargestellten Kurven. Die Bestrahlungsstärke für die BaI-Linie fällt nach Erreichung eines Maximums wieder ab. Diese Abnahme wird dadurch hervorgerufen, daß ständig ein Teil des Bariums durch das Sonnenlicht ionisiert wird und dann Licht einer anderen Wellenlänge aussendet.

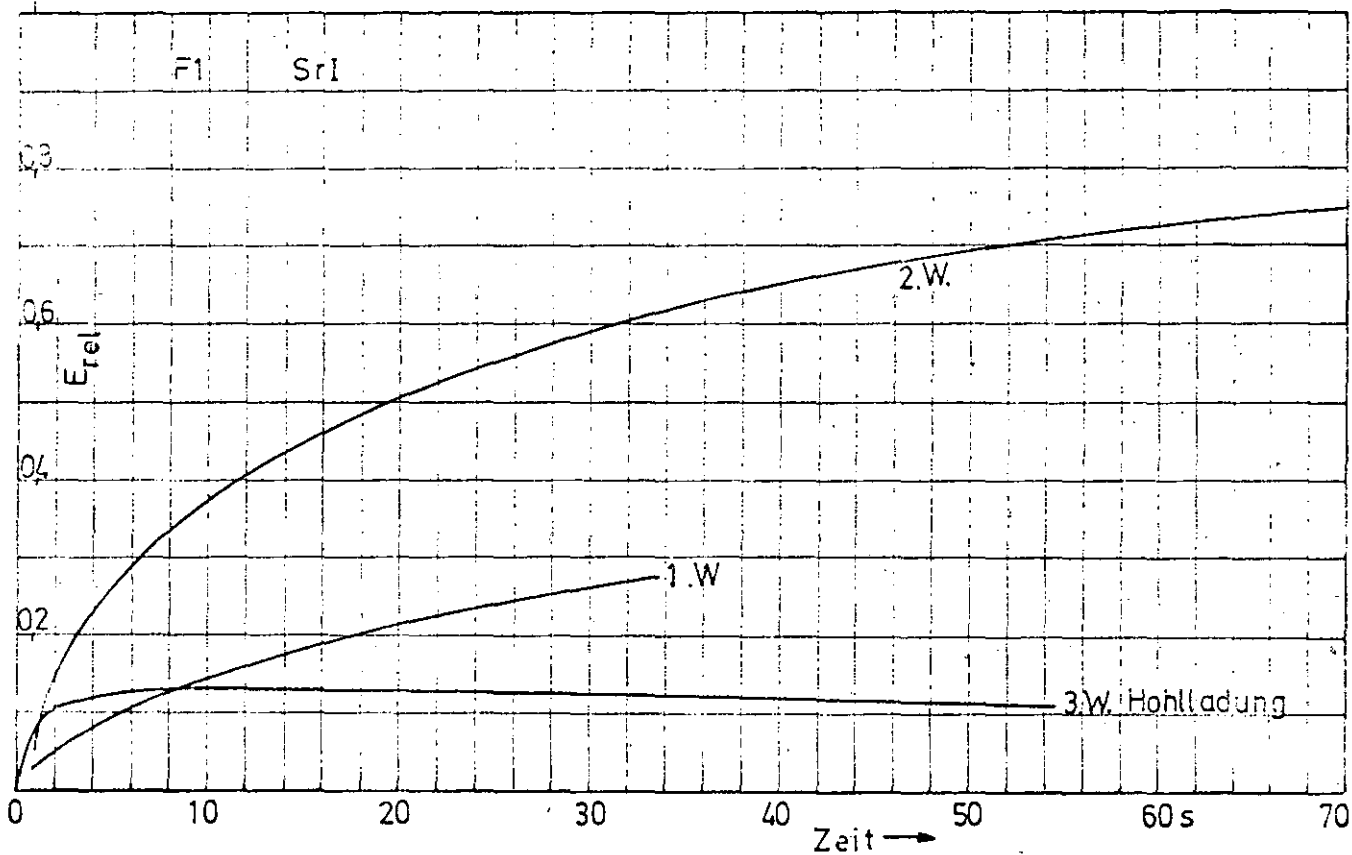


Abb.5.8 Verlauf der relativen Bestrahlungsstärke als Funktion der Zeit für die SrI-Linie.

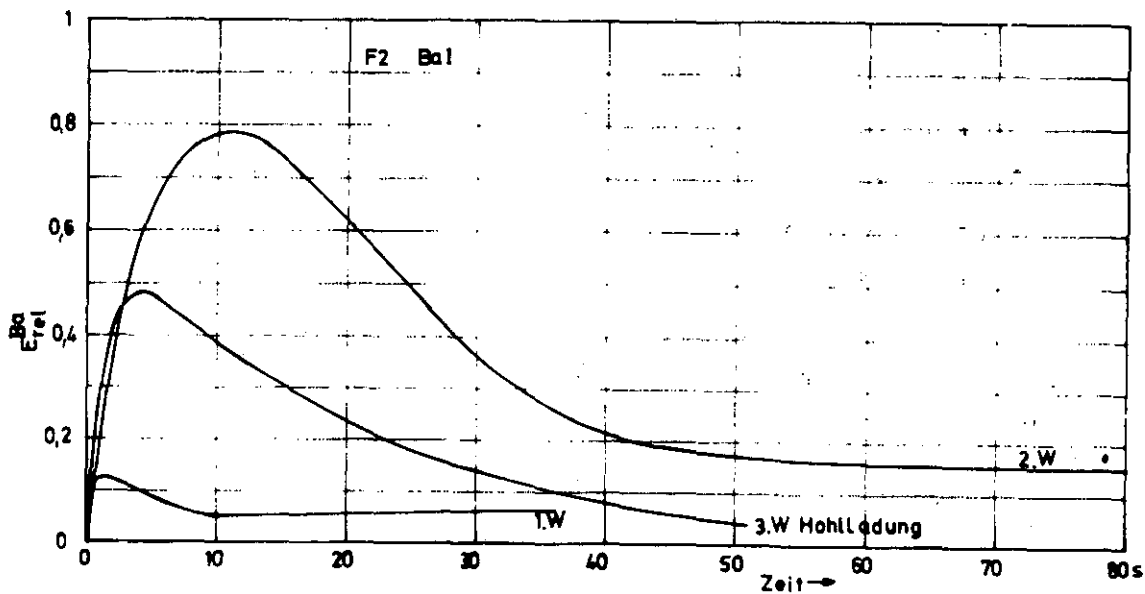


Abb.5.9 Verlauf der relativen Bestrahlungsstärke als Funktion der Zeit für die BaI-Linie.

6. Aussagen über den absoluten Strahlungsfluß

6.1. Allgemeines

Wenn eine Strahlung der Wellenlänge λ und der Leistung P auf die Fotokathode eines Fotomultipliers fällt, so wird ein Elektronenstrom I_K hervorgerufen.

$$I_K = \frac{P \lambda e Q(\lambda)}{h c} \quad (6.1)$$

$Q(\lambda)$ = Quantenwirkungsgrad (Kap.3.2.), e = Elementarladung, h = Planck'sches Wirkungsquantum, c = Lichtgeschwindigkeit.

Dieser Strom an der Kathode wird durch die Dynoden des Fotomultipliers um den Faktor

$$M = \delta^n \quad (6.2)$$

verstärkt, wobei δ der Sekundäremissionskoeffizient der Dynoden und n die Anzahl der Dynoden ist.

Für den Anodenstrom I ergibt sich dann:

$$I = M \frac{P \lambda e Q(\lambda)}{h c} \quad (6.3)$$

Die Strahlungsempfindlichkeit des Fotomultipliers ist definiert als $E(\lambda) = I/P$ und ergibt sich unter Verwendung von Gl.6.3 zu:

$$E(\lambda) = M \frac{\lambda e Q(\lambda)}{h c} \quad (6.4)$$

Wird die Kathode einem spektralen Strahlungsfluß $\phi(\lambda)$ ausgesetzt, so resultiert daraus folgender Anodenstrom:

$$I = \int_0^{\infty} E(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda \quad (6.5)$$

($\phi(\lambda)$ in Leistung pro Wellenlänge)

Der Lichtstrom, gemessen in Lumen, hat dann folgende Größe:

$$\phi_l = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda \quad (6.6)$$

K_m = Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents, $V(\lambda)$ = Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges.

Die Empfindlichkeit des Fotomultipliers ist definiert als

$$S = I/\phi_1.$$

Daraus ergibt sich:

$$S = \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda} \quad (6.7)$$

Weiterhin kann man die dimensionslose relative spektrale Verteilungsfunktion $\phi_{rel}(\lambda)$ durch die Beziehung

$$\phi(\lambda) = K \phi_{rel}(\lambda) \quad (6.8)$$

eingeführen. K kann z.B. dem Strahlungsfluß im Maximum der Verteilungsfunktion gleichgesetzt werden. Wenn man dann $\phi(\lambda)$ durch K dividiert erhält man eine relative Verteilungsfunktion wie sie z.B. in Abb.3.17 für die Eichlichtquelle dargestellt worden ist.

Wenn man Gl.6.8 und 6.4 in 6.7 einsetzt erhält man:

$$S = \frac{M (e/hc) \int_0^{\infty} Q(\lambda) \phi_{rel}(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi_{rel}(\lambda) d\lambda} \quad (6.9)$$

Wenn eine Spektrallinie den spektralen Strahlungsfluß $\phi_S(\lambda)$ am Fotometer hervorruft und durch ein Interferenzfilter der spektralen Durchlässigkeit $F(\lambda)$ auf die Fotokathode fällt, so ergibt das folgenden Anodenstrom:

$$I = M (e/hc) \int_0^{\infty} \lambda Q(\lambda) F(\lambda) \phi_S(\lambda) d\lambda \quad (6.10)$$

Wenn man Gl.6.8 mit λ/hc multipliziert und für $\phi_S \text{ rel } \lambda/hc = \tilde{\phi}_S \text{ rel}$ schreibt, so erhält man:

$$(\lambda/hc) \phi_S(\lambda) = K_S \tilde{\phi}_S \text{ rel}(\lambda) \quad (6.11)$$

K_S hat die Dimension von $\phi_S \lambda/hc$ d.h. Quanten pro Zeit und Wellenlänge. Das Zeichen \sim bedeutet also, daß bei der entsprechenden Größe die Leistung in Form von Quanten pro Zeiteinheit auftritt, oder daß diese Größe damit zusammenhängt.

Weiterhin gilt:

$$K_S \tilde{\phi}_S = K_S \lambda_K/hc \quad (6.12)$$

λ_K ist die Wellenlänge bei welcher $\phi_S \text{ rel}(\lambda_K) = 1$.

Gl.6.11 in 6.10 eingesetzt ergibt:

$$I = M e K_S \int_0^{\infty} Q(\lambda) F(\lambda) \phi_{S \text{ rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda \quad (6.13)$$

Aus Gl.6.11 folgt für den Strahlungsfluß:

$$\phi_S^{\sim} = K_S \int_0^{\infty} \phi_{S \text{ rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda \quad \text{in } \frac{\text{Quanten}}{\text{Zeit}} \quad (6.14)$$

Bei einer Absoluteichung ist die Größe ϕ_S oder ϕ_S^{\sim} zu bestimmen, welche bei einem bestimmten Anodenstrom I vorhanden war. Da aber $\phi_{S \text{ rel}}^{\sim}$ als bekannt vorausgesetzt werden muß, genügt es K_S^{\sim} zu bestimmen, ϕ_S^{\sim} erhält man dann aus Gl.6.14 .

Aus Gl.6.13 folgt:

$$K_S^{\sim} = \frac{I}{M e \int_0^{\infty} Q(\lambda) F(\lambda) \phi_{S \text{ rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda} \quad (6.15)$$

In dieser Gleichung ist der Vervielfältigungsfaktor M unbekannt, er kann jedoch aus Gl.6.9 bestimmt werden, wenn die Empfindlichkeit S bekannt ist.

$$M = \frac{S K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}{(e/hc) \int_0^{\infty} \lambda Q(\lambda) \phi_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \quad (6.16)$$

Weiterhin muß noch bekannt sein, welches Spektrum die Lichtquelle ($\phi_{\text{rel}}(\lambda)$) hatte, mit der S bestimmt wurde.

Wenn neben der Gesamtempfindlichkeit des Fotomultipliers noch die Kathodenempfindlichkeit S_K bekannt ist, so wird:

$$M = S/S_K \quad (6.17)$$

6.2. Berechnung für F1

Aus Tab.3.3 folgt: $S_K = 78 \mu\text{A/lm}$. Aus Abb.3.19 folgt $F(\lambda)$.

Aus Abb.3.7, Tab.3.3 und {2} Tab.1 folgt:

$$Q(4607\text{\AA}) = (0,157 \cdot 78 \mu\text{A/lm}) / (70 \mu\text{A/lm}) = 0,175$$

$\phi_{S \text{ rel}}^{\sim}(\lambda)$ ist zur Zeit nicht bekannt {11}. Die Linienbreite ist jedoch sicher so gering, daß sie gegenüber $F(\lambda)$ und $Q(\lambda)$ nicht ins Gewicht fällt, d.h. Gl.6.15 kann für den monochromatischen Fall umgeschrieben werden.

$$K_{\tilde{S}} = \phi_{\tilde{S}} = \frac{I}{M e Q F} \quad (6.18)$$

Um den Vervielfältigungsfaktor M bestimmen zu können, muß noch die Empfindlichkeit S ermittelt werden.

Aus Tab.3.3 erhält man, $S = 200\text{A/lm}$ bei $U_H = 1490\text{V}$. Die Messung mit F1 wurde jedoch hauptsächlich bei $U_H = 1100\text{V}$ durchgeführt, aus diesem Grunde muß S_{1100} bestimmt werden. Dafür kann man den gemessenen Verlauf der Empfindlichkeit als Funktion der Hochspannung in Abb.3.9 heranziehen. Wenn man die Empfindlichkeit S durch den Anodenstrom I bei 1490V dividiert, so erhält man einen Lichtstrom von $\phi_1 = 1,4 \cdot 10^{-7}\text{lm}$. Dividiert man nun den Anodenstrom bei 1100V durch dieses ϕ_1 , so erhält man $S_{1100} = 4,1 \cdot 10^{-6}\text{A}/1,4 \cdot 10^{-7}\text{lm} = 30\text{A/lm}$.

Daraus ergibt sich gemäß Gl.6.17

$$M_{1100} = 3,8 \cdot 10^5$$

Der Tab.4.2 entnimmt man, daß der relativen Bestrahlungsstärke 1 eine Spannungsanzeige am Schreiber von $4,3\text{V}$ entspricht. Der Abb.3.15 kann man dann den zugehörigen Anodenstrom entnehmen, wenn man die Verstärkereingangsspannung durch $R_A = 0,5\text{M}\Omega$ dividiert.

$$I = 0,28\mu\text{A}$$

Unter Verwendung von Gl.6.18 erhält man mit $F = 0,4$ und $Q = 0,175$ den Strahlungsfluß.

$$\phi_{\tilde{S}} = 0,66 \cdot 10^8 \text{Quanten/s}$$

Da die Eintrittsblende B_1 einen Durchmesser von 1cm und damit eine Fläche von $0,786 \cdot 10^{-4}\text{m}^2$ hatte, entspricht der relativen Bestrahlungsstärke 1 ein Absolutwert der Bestrahlungsstärke von

$$E = 0,84 \cdot 10^{12} \text{Quanten/m}^2\text{s}$$

Wenn man die Wolkenhelligkeit in Rayleigh (R) ausdrücken will, so benötigt man zusätzlich zu den bis hierher bekannten Größen noch den jeweiligen Raumwinkel unter welchem eine bestimmte Wolke zur Zeit der Messung dem Beobachter erschien.

Aus Abb.4.5 läßt sich der Winkeldurchmesser der ersten Wolke 25s nach ihrem Erscheinen direkt ablesen, er beträgt $2,04^\circ$. Dieser Winkel entspricht einem Raumwinkel $\omega = 1 \cdot 10^{-3}\text{sr}$. Die

relative Bestrahlungsstärke nach 25s beträgt gemäß Abb.5.3 $E_{rel} = 0,967$; dies entspricht einer absoluten Bestrahlungsstärke von $E = 0,87 \cdot 10^8$ Quanten/cm²s. Daraus errechnet sich eine mittlere Strahldichte $L = 0,87 \cdot 10^{11}$ Quanten/cm²s sr, oder in Rayleigh ausgedrückt,

$$4\pi L = 1,1 \cdot 10^6 R$$

Auf die gleiche Weise wurden folgende Werte errechnet.

	1.W.n. 25s	2.Wolke n. 11s	30s	3.Wolke n. 30s	41s	<u>Tabelle 6.1</u>
$4\pi L/10^6 R$	1,1	0,96	0,88	0,68	0,71	

Die Tab.6.1 gibt die scheinbare Emissionsrate unter der Voraussetzung eines völlig isotropen Strahlers und ohne Absorption an. {3}

6.3. Diskussion der Berechnung und der Relativeichung

Diskussion der Berechnung

Die größte Unsicherheit in den Absolutwerten ist durch den Vervielfältigungsfaktor M gegeben. Dieser Faktor wurde im wesentlichen aus zwei Eichangaben des Herstellers bestimmt (Gl.6.17). Die Messung der Kathoden- und der Gesamtempfindlichkeit erfolgte beim Hersteller des Fotomultipliers mit einer Wolframbandlampe als Eichlichtquelle A. Da beide Werte mit der selben Lampe bestimmt wurden, fallen evtl. Fehler, welche durch eine unzureichende Lichtquelle hervorgerufen werden können, heraus. Man kennt also den Vervielfältigungsfaktor bei der angegebenen Spannung von 1490V zum Zeitpunkt der Eichung beim Hersteller. Die Genauigkeit der lichttechnischen Werte, welche für die Einzelangaben der Empfindlichkeiten wichtig sind, gehen, wie schon erwähnt, in M nicht ein.

Die Empfindlichkeiten S und S_K des Fotomultipliers unterliegen zeitlichen Änderungen. Jeder Fotomultiplier zeigt ein anderes Alterungsverhalten und daraus resultiert eine Unsicherheit von M. Die Fehler bei der Reduktion des Vervielfältigungsfaktors von 1490V auf 1100V mittels Abb.3.9 sind gegenüber den

Alterungsunsicherheiten vernachlässigbar und sogar teilweise schon in ihnen enthalten, da der Kurvenverlauf in Abb.3.9 auch alterungsabhängig ist.

Alle anderen Werte, welche bei der Berechnung von $\phi_{\tilde{S}}$ benutzt wurden, sind im Verhältnis zu den Alterungsunsicherheiten sehr genau bekannt, so daß sie hier nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

Bei der Herleitung der Gl.6.18, nach welcher $\phi_{\tilde{S}}$ berechnet wurde, ist die Voraussetzung gemacht worden, daß der Anodenstrom I proportional zum einfallenden spektralen Strahlungsfluß $\phi_{\tilde{S}}(\lambda)$ ist. Diese Aussage bedeutet, daß der Fotomultiplier linear arbeiten soll. Wie in Abb.3.11 gezeigt wurde, ist dies jedoch nur bei kleinen Beleuchtungsstärken der Fall.

Daraus geht hervor, daß die Gl.6.18 und auch Gl.6.15 das Verhalten des Fotomultipliers nicht exakt beschreiben. Die beiden Fotomultipliereigenschaften $Q(\lambda)$ und M können von der Größe des Strahlungsflusses $\phi_{\tilde{S}}$ abhängen.

$$K_{\tilde{S}} = \frac{I}{e M(\phi_{\tilde{S}}) \int_0^{\infty} Q(\lambda, \phi_{\tilde{S}}) F(\lambda) \phi_{\tilde{S}} \text{rel}(\lambda) d\lambda} \quad (6.19)$$

Aus Abb.3.11 folgt, daß die Nichtlinearität im Bereich von $E_{\text{rel}} = 0$ bis 4 eine Abweichung des Anodenstromes I bis 8% zur Folge hat. Da nicht bekannt ist, bei welchem E die Eichung des Fotomultipliers vorgenommen wurde, muß mit einer Unsicherheit von ca.10% gerechnet werden.

Weiterhin muß noch erwähnt werden, daß die durchgeführte Rechnung nur für senkrechten Lichteinfall gilt, da die Filterdurchlässigkeit nur in diesem Fall 0,4 ist.

Auf Grund der hier angestellten Überlegungen und den Erfahrungen mit dem Fotometer, erscheint es möglich für E/E_{rel} folgenden Wert anzugeben:

$$E/E_{\text{rel}} = (0,96 \cdot 10^8 \text{Quanten/cm}^2\text{s}) \pm 50\%$$

Aus Tabelle 6.1 geht hervor, daß die scheinbare Emissionsrate von Wolke 1 nach Wolke 3 hin abnimmt. Die geringen Unterschiede in der Strahldichte einer Wolke während verschiedener Zeiten können darauf beruhen, daß in die Berechnung dieser Größen der Raumwinkel unter dem die Wolke erscheint eingeht und sich

dieser nicht genau bestimmen läßt.

Diskussion der Relativeichung

Bei der Relativeichung des Fotometers liegen andere Verhältnisse vor, als bei der Messung, deshalb soll kurz diskutiert werden, inwieweit das durchgeführte Verfahren der Umzeichnung der Meßwerte in relative Bestrahlungsstärken anwendbar ist.

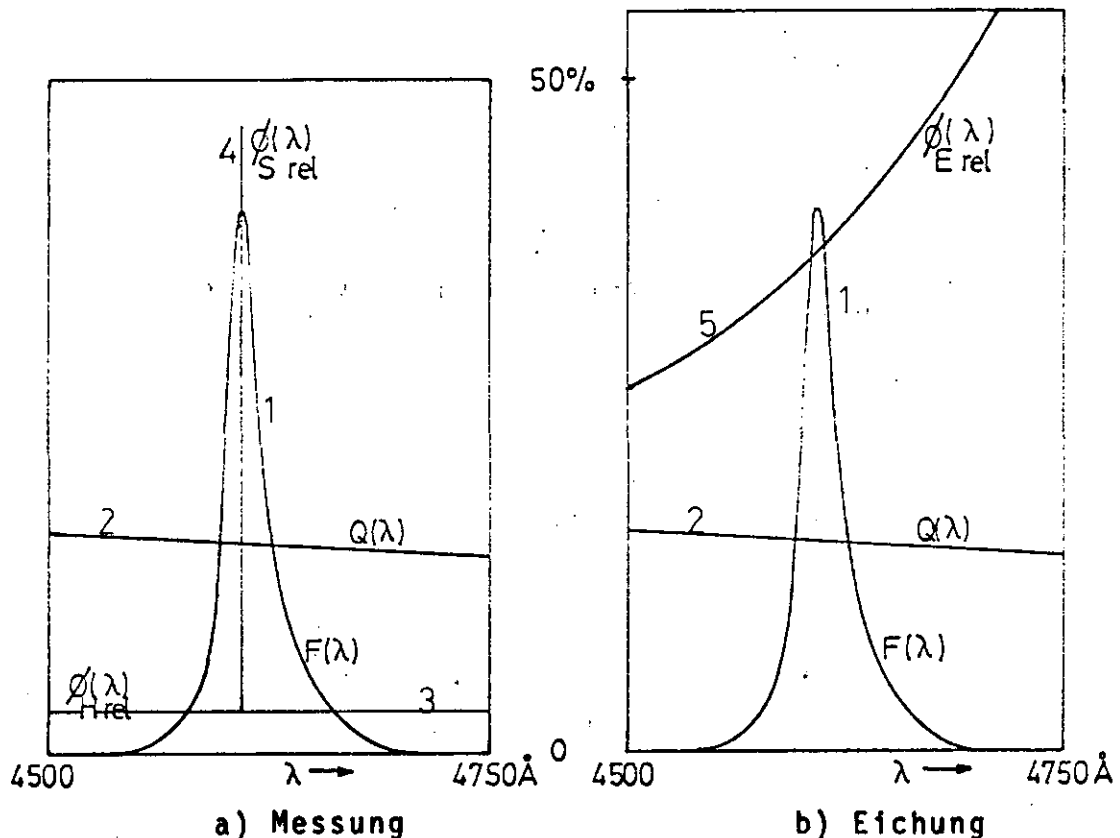


Abb. 6.1

1=Filterdurchlässigkeit in %, 2=Quantenwirkungsgrad in %, 3=Himmelshintergrund (willk.Einh.), 4=Strontiumlinie (willk.Einh.), 5=Rel.Emission der Standard-Lichtquelle (Max.=100%).

In Abb.6.1 ist das prinzipielle Zusammenwirken der einzelnen optischen Komponenten, sowohl für die Messung a), als auch für die Eichung b), dargestellt. Der Unterschied zwischen a) und b) ist durch die verschiedene spektrale Verteilung des angebotenen Lichtes bedingt. Es ist nun zu untersuchen ob die Eichung gemäß b) auf die Messung gemäß a) Anwendung finden kann.

Das bei der Messung einfallende Licht setzt sich additiv aus der Hintergrundstrahlung und der Linienstrahlung zusammen, d.h. für den spektralen Strahlungsfluß kann man schreiben:

$$\phi_{\text{ges}}^{\sim}(\lambda) = \phi_{\text{S}}^{\sim}(\lambda) + \phi_{\text{H}}^{\sim}(\lambda) \quad (6.20)$$

Die Fotometeranzeige in Volt kann über die Verstärkercharakteristik (Abb.3.15) und den Arbeitswiderstand R_A in den Anodenstrom I umgerechnet werden.

$$I = \frac{U}{V(U) R_A} \quad (6.21)$$

$V(U)$ = Spannungsabhängiger Verstärkungsfaktor aus Abb.3.15 .

Der Zusammenhang zwischen $\phi(\lambda)$ und I ist durch Gl.6.13 gegeben.

$$I = M e K^{\sim} \int_0^{\infty} Q(\lambda) F(\lambda) \phi_{\text{rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda$$

Für die Messung (I_M) und die Eichung (I_E) gilt dann:

$$I_M = M e \{ K_{\text{S}_0}^{\sim} \int_0^{\infty} Q(\lambda) F(\lambda) \phi_{\text{S rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda + K_{\text{H}_0}^{\sim} \int_0^{\infty} Q(\lambda) F(\lambda) \phi_{\text{H rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda \}$$

$$I_E = M e K_{\text{E}_0}^{\sim} \int_0^{\infty} Q(\lambda) F(\lambda) \phi_{\text{E rel}}^{\sim}(\lambda) d\lambda$$

Wobei K_{S}^{\sim} , K_{H}^{\sim} und K_{E}^{\sim} jeweils die maximalen Werte der entsprechenden spektralen Strahlungsflüsse sind. G ist die Grauglasdurchlässigkeit.

Wie oben erwähnt, setzen diese Gleichungen ein lineares Verhalten der Fotomultiplier voraus, d.h. $I \sim K^{\sim} \phi_{\text{rel}}^{\sim}(\lambda)$. In diesem Fall kann eine Relativeichung der Messung vorgenommen werden.

Bei einer vorhandenen Nichtlinearität (Abb.3.11) kann die Relativeichung ebenfalls erfolgen, wenn die Nichtlinearität nicht von der Wellenlänge des einstrahlenden Lichtes abhängt, sondern nur von der absoluten Größe des integralen Strahlungsflusses.

Da bei der Messung und der Eichung das schmalbandige Interferenzfilter mit 48\AA Halbwertsbreite benutzt wurde, kann angenommen werden, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit die geschilderten Einflüsse zu vernachlässigen sind. Diese Annahme wird getragen durch die Meßergebnisse bei den Nacheichungen welche unter 5.1 beschrieben worden sind.

7. Anhang

7.1. Ergänzungen

Fotometrische Grundgrößen und Einheiten

In Tab.7.1 sind die Umrechnungsfaktoren der wichtigsten Leuchtdichteinheiten nach {1} zusammengestellt.

Einheit	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	asb	sb	L	$\text{cd} \cdot \text{ft}^{-2}$	fL	$\text{cd} \cdot \text{in}^{-2}$
1 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	= 1	π	10^{-4}	$\pi \cdot 10^{-4}$	$9,29 \cdot 10^{-2}$	0,2919	$6,45 \cdot 10^{-4}$
1 Apostilb (asb)	= $\frac{1}{\pi}$	1	$\frac{1}{\pi} \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$2,957 \cdot 10^{-2}$	0,0929	$2,054 \cdot 10^{-4}$
1 Stilb (sb)	= 10^4	$\pi \cdot 10^4$	1	π	929	2919	6,452
1 Lambert (L)	= $\frac{1}{\pi} \cdot 10^4$	10^4	$\frac{1}{\pi}$	1	$2,957 \cdot 10^2$	929	2,054
1 Candela per square foot ($\text{cd} \cdot \text{ft}^{-2}$)	= 10,764	33,82	$1,076 \cdot 10^{-3}$	$3,382 \cdot 10^{-3}$	1	π	$6,94 \cdot 10^{-3}$
1 Footlambert (fL)	= 3,426	10,764	$3,426 \cdot 10^{-4}$	$1,0764 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{\pi}$	1	$2,211 \cdot 10^{-3}$
1 Candela per square Inch ($\text{cd} \cdot \text{in}^{-2}$)	= 1550	4869	0,155	0,4869	144	452,4	1

(Für die Einheit $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ist im Ausland gelegentlich auch die Benennung Nit, für die Einheit asb die Benennung Blondel im Gebrauch)

Tabelle 7.1 Umrechnungsfaktoren der Leuchtdichteinheiten

Die vom deutschen Normenausschuß herausgegebenen Empfehlungen bezüglich strahlungsphysikalischer und lichttechnischer Größen sind in Tab.7.2 nach {1} zusammengestellt.

Verstärker

In Abb.3.13 ist das komplette Schaltbild des logarithmischen Verstärkers dargestellt und in Abb.3.5 eine vereinfachte Form. Die integrierten Bausteine vom Typ $\mu\text{A}709$ sind komplette Differenzverstärker, welche im äußeren Schaltkreis nur noch eine Frequenzkompensation benötigen. Die beiden anderen integrierten Bausteine vom Typ $\mu\text{A}726$ enthalten ein Transistorpaar und eine elektronisch gesteuerte Heizvorrichtung, welche das Transistorpaar immer auf der gleichen Temperatur hält. Ein temperaturstabilisiertes Transistorpaar dient als Eingang für den Verstärker und das andere bewirkt die Logarithmierung.

Strahlungsphysikalische Größen

Lichttechnische Größen

Größe	Zeichen	Beziehung	Einheit	Größe	Zeichen	Beziehung	Einheit
Strahlungsmenge Strahlungsenergie	Q		Ws	Lichtmenge	Q _e	Q _e = ∫ φ _e dt	Lumenstunde Lumensekunde lmh, lms
Strahlungsfluß	φ	φ = dq/dt	W	Lichtstrom	φ _e	φ _e = K _m ∫ φ _λ v(λ) dλ	Lumen lm 1 lm = cd · sr
Strahlstärke	I	I = dφ/dΩ ₁	$\frac{W}{sr}$	Lichtstärke	I _e	I _e = dφ _e /dω	Candela cd
Strahldichte	L	L = $\frac{d^2 \phi}{d\Omega dA \cos \epsilon}$	$\frac{W}{sr \cdot m^2}$	Leuchtdichte	L _e	L _e = $\frac{d^2 \phi_e}{\cos \epsilon dA d\omega}$	stilb sb 1 sb = 1 cd/m ²
Spezifische Ausstrahlung	M	M = dφ/dA ₁	$\frac{W}{m^2}$	Spezifische Lichtausstrahlung	M _e	M _e = dφ _e /dA ₁	$\frac{lm}{m^2}$
Bestrahlungs- stärke	E	E = dφ/dA ₂	$\frac{W}{m^2}$	Beleuchtungs- stärke	E _e	E _e = dφ _e /dA ₂	Lux lx 1 lx = 1 lm/m ²
Bestrahlung	H	H = ∫ Edt	$\frac{Ws}{m^2}$	Belichtung	H _e	H _e = ∫ E _e dt	Luxsekunde 1 lxs = 1 lms/m ²

Anmerkungen:

A = durchstrahlte Fläche, Index 1 = Ausstrahlung, Index 2 = Einstrahlung, ω, Ω = Raumwinkel gemessen in Steradian (sr), ε = Winkel Flächennorm., strahlrichtung, dω = cos ε dA ω₀ / r², ω₀ = 1 sr, v(λ) spektrale Hellempfindlichkeit des Auges, K_m = Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents = 680 lm/W, φ_λ = dφ/dλ.

Tabelle 7.2

Schwierigkeiten beim Aufbau des Verstärkers traten vorallem durch unkontrollierte Schwingungen und starkes Rauschen auf. Durch sorgfältige Verschaltung und geeignete Frequenzkompensationen konnten die Schwierigkeiten jedoch beseitigt werden.

In Abb.7.1 sind die beiden gedruckten Schaltungen und die fertigen Steckkarten wiedergegeben.

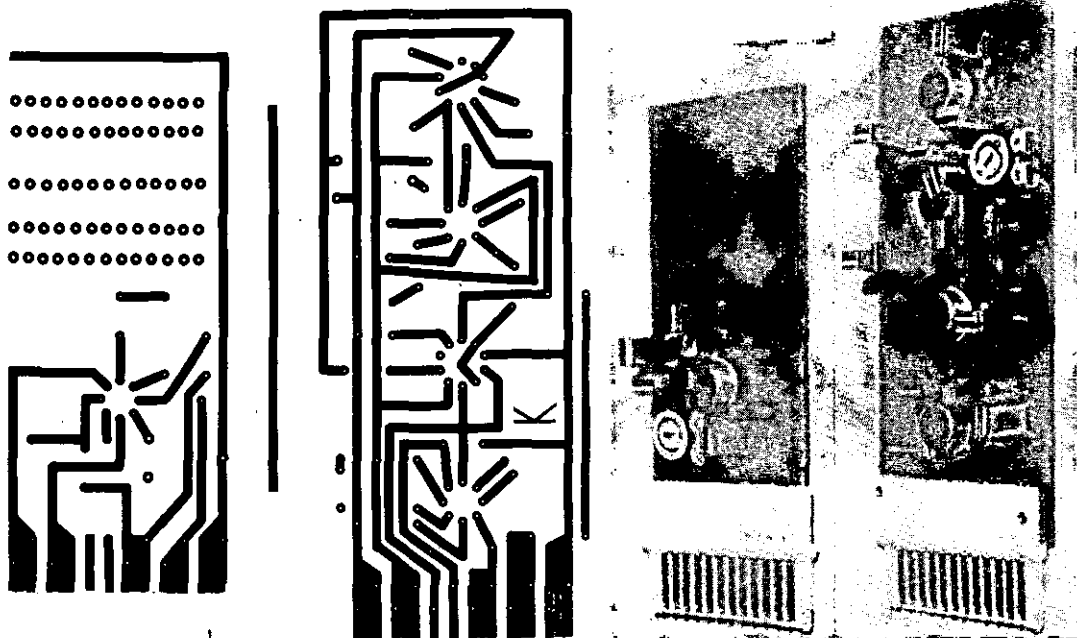


Abb.7.1 gedruckte Schaltungen M=1:1 und Steckkarten

Spannungsteiler

Der Spannungsteiler für den Fotomultiplier ist aus 24 50k Widerständen mit einer Belastbarkeit von 2W aufgebaut. Da jeder Spannungsteilerwiderstand 100k haben soll, wurden immer 2 Widerstände hintereinandergeschaltet und dadurch eine Belastbarkeit von 4W erreicht. Durch Verwendung solch hochbelastbarer Widerstände wird eine möglichst kleine Erwärmung der Widerstände während des Betriebes erreicht. Infolge der großen räumlichen Abmessungen der Widerstände wird die in ihnen erzeugte Wärme gut abgeführt. Dadurch ändert sich der Widerstandswert nur unwesentlich und durch die Stifte des Fotomultipliers erfolgt keine Aufheizung der Dynoden, dies trägt zur Verringerung des Dunkelstromes bei. Die vielen großen Widerstände mußten auf relativ kleinem Raum untergebracht werden. Um dies zu erreichen wurden zwei gedruckte Schaltungen entwickelt (Abb.7.2), welche die gesamten Widerstände aufnehmen. Auf diese

Weise konnte das Auftreten von Korona- oder Spitzenentladungen bei der angelegten Hochspannung von 1000V vermieden werden.

In Abb.7.2 sind die beiden Schaltungen verkleinert wiedergegeben.

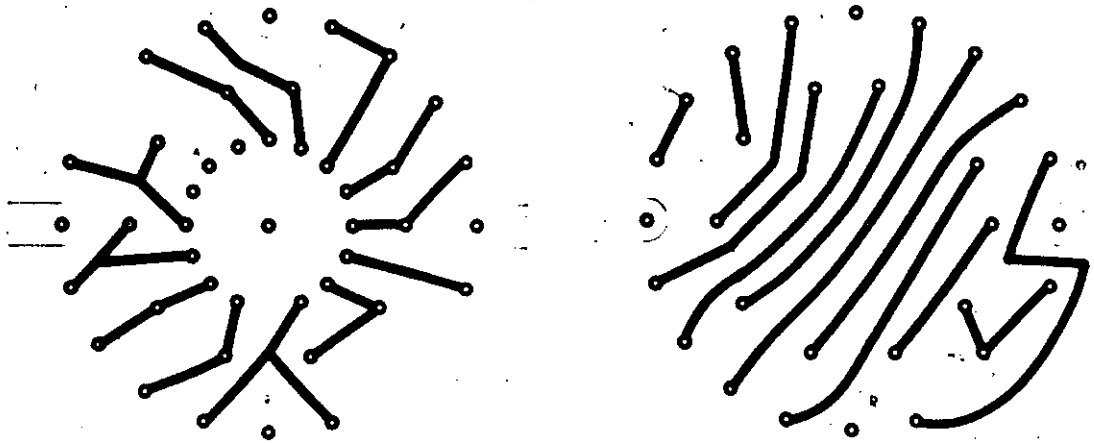


Abb.7.2 verkleinerte Schaltplattinen des Spannungsteilers

7.2. Abkürzungen

A	= Amperé = 10^3 mA = 10^6 μ A = 10^9 nA
A	= Fläche
\AA	= 10^{-10} m
B ₁	= Blende vor dem Fotomultiplier
B ₂	= Fotometereintrittsblende
Ba	= Barium
C	= Kondensator
C	= Celsius
c	= Lichtgeschwindigkeit
E	= Strahlungsempfindlichkeit des Fotomultipliers
E	= Bestrahlungsstärke
E _{rel}	= Relative Bestrahlungsstärke
e	= Elementarladung
EMI	= Electric & Musical Industries Limited
F	= Farad = 10^6 F = 10^9 nF = 10^{12} pF
F1	= Fotometerkanal 1
F2	= Fotometerkanal 2
F(λ)	= Filterdurchlässigkeit
G	= Grauglasdurchlässigkeit
h	= Planck'sches Wirkungsquantum
h	= Höhe
h	= Stunden
I	= Elektrischer Strom
I _D	= Dunkelstrom des Fotomultipliers
K	= Kiloohm
K	= Maximalwert des Strahlungsflusses
K _E	= " der Eichlichtquelle
K _H	= " der Hintergrundstrahlung
K _S	= " der Spektrallinie
K _m	= Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents
L	= Strahldichte
lm	= Lumen
M	= Megaohm
M	= Elektronenvervielfachungsfaktor

m = Minuten
 m = Meter = 10^2 cm = 10^3 mm = 10^9 nm
 P = Leistung
 $Q(\lambda)$ = Quantenwirkungsgrad
 R = Rayleigh
 R = Widerstand
 R_A = Arbeits-, oder Ableitwiderstand
 S = Empfindlichkeit in A/lm (Gesamtempfindlichkeit)
 S_K = Empfindlichkeit der Fotokathode
 s = Sekunde
 SEV = Sekundärelektronenvervielfacher = Fotomultiplier
 Skt. = Skalenteile
 SLQ = Standard-Lichtquelle
 Sr = Strontium
 sr = Steradian
 t = Zeit
 U = Elektrische Spannung
 U_H = Hochspannung am Fotomultiplier
 V = Verstärkungsfaktor
 V = Volt = 10^3 mV = 10^{-3} kV
 $V(\lambda)$ = Augenempfindlichkeit (helladaptiert)
 W = Watt
 W = Wolke
 α = Öffnungswinkel des Fotometers
 γ = Randwinkel des Fotometergesichtsfeldes
 δ = Sekundäremissionskoeffizient
 θ = Einfallswinkel gegen die optische Achse
 λ = Wellenlänge
 ν = Frequenz
 ϕ = Strahlungsfluß
 $\phi(\lambda)$ = Spektraler Strahlungsfluß
 ω = Raumwinkel
 ° = Grad

7.3. Literatur

- {1} Normblätter, DIN 5031 und 5032
- {2} EMI - Katalog: photomultiplier tubes
- {3} Chamberlain, J.W., Physics of the Aurora and Airglow. Vol.2, Intern.Geoph.Series. Academic Press. New York a. London 1961.
- {4} Hartmann u. Bernhard, Fotovervielfacher und ihre Anwendung in der Kernphysik. Akademie-Verlag Berlin 1957.
- {5} Hablick u. Kappler, Oberblick über das Raketenexperiment Sr1. Interner Bericht, Sept.69 .
- {6} Bergmann u. Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik. Walter de Gruyter & Co Berlin 1962.
- {7} Cohen, B.I., Hübner, H.I., Linearitätsuntersuchungen an Photomultipliern. Meßtechnik 11/68.
- {8} Haser, L. Use of Artificial Barium Clouds to Study Magnetic and Electric Fields in the Atmosphere. Aurora and Airglow August 15.-26., 1966.
- {9} Landolt-Börnstein IV. Band 3. Teil 1957
- {10} Kappler, H.M. Private Mitteilungen. Bereich Extraterrestrische Physik, Ruhr Uni. Bochum
- {11} Haser, L. Private Mitteilungen. Max Planck-Institut für Extraterrestrische Physik Garching.