Spektroskopische Untersuchungen an den pn-CCD-Detektoren der Satelliten XMM und ABRIXAS

Diplomarbeit

vorgelegt von

Josef Pal

Eberhard-Karls-Universität Tübingen
Institut für Astronomie und Astrophysik, Abt. Astronomie

Juli 1999

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **9**

2 Das EPIC Kamera-System **11**

2.1 Der MPE/AIT X-Ray Imager MAXI 12
2.2 Der pn-CCD-Detektor und die EPEA 12
2.2.1 Der OP und der ADC 13
2.2.2 Die SECOM-Karte 14
2.2.3 Die CPU-Karte 14
2.2.4 Der Mastersequenzer 14
2.3 Betriebsmodi des Detektors 15
2.3.1 Der Full Frame Mode 15
2.3.2 Die Window Modi 15
2.3.3 Der Timing Mode 16
2.3.4 Der Burst Mode 16

3 Der EPIC pn-CCD Detektor **17**

3.1 Kleine Halbleiterlehre 17
3.1.1 Der pn-Übergang 18
3.2 Das pn-CCD 18
3.2.1 Die Seitwärtsdepletion 19
3.2.2 Pixelstruktur des Detektors 19
3.3 Die on-chip Signalverarbeitung
und der CAMEX 21

4 Eigenschaften des CCD-Signals **23**

4.1 Der Offset 23
4.2 Das Rauschen (Noise) 24
4.3 Die Verstärkung (Gain) 26
4.4 Die CTE 27

5 Die Vakuumtestanlage des IAAT **29**
5.1 Die Röntgenquelle und das Filterrad 30
5.1.1 Das Filterrad 30
5.2 Die Vakuumanlage 31
5.3 Die Kühlung 32
5.3.1 Die Temperaturregelung 32
5.4 Die Versorgungsspannungen 34
5.5 Das Sicherheitssystem 34
5.6 Die Datenwege 35

6 Messungen an der Testanlage **37**
6.1 Vorbereitung der geplanten Messungen 38
6.2 Messungen 40

7 Auswertung der Messungen **43**
7.1 IDL-Programme 43
7.2 Auswertung der Offset-Messungen 44
7.3 Auswertung der Noise-Messungen 46
7.4 Auswertung der Spektren 47
7.4.1 Ergebnisse bei -108°C mit der Al-K_α-Linie 49
7.4.2 Ergebnisse bei -80°C mit der Al-K_α-Linie 52
7.4.3 Ergebnisse bei -108°C mit der Ti-K_α-Linie 55
7.5 Diskussion der Ergebnisse 56
7.6 Folgerungen für die Korrektur der Spektren 58
7.7 Verbindung zwischen Lichtmenge und Rauschen 59

8 Zusammenfassung und Zukunfsaussichten **63**

A idl-Routinen **65**

B Bilder **67**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Die Instrumente auf XMM 11
2.2 Das Detektor-Array 13
2.3 Large Window Mode 15

3.1 Der pn-Übergang 18
3.2 Die Depletion 19
3.3 Die Pixelstruktur 20
3.4 Die Phi-Pulse 20
3.5 Das Schieben 21
3.6 Blockschaltbild des CAMEX 22

4.1 Typische Offsetverteilung 24
4.2 Typische Rauschverteilung 25
4.3 Verstärkungskarte eines CCDs 26
4.4 CTE-Verlauf eines CCDs 28

5.1 Schematischer Aufbau der Anlage 29
5.2 Prinzip der Lichtfalle 31
5.3 Regelschaltung für die Temperatur 33
5.4 Datenwege 36

6.1 Spektrum der Mg-K$_\alpha$-Linie 37
6.2 Diodenkennlinie des verwendeten LED 39
6.3 Abbildung der Lichtquellen 39
6.4 Detektorbild der beiden Lichtquellen. Rot gekennzeichnet ist der LED-Peak, grün der Röntgenpeak. Schieberichtung ist nach unten. 40
6.5 Zeilenverteilung der Offset-Differenzen über die Spalten 28 bis 31 41

7.1 Die Lichtmenge in Abhängigkeit der LED-Spannung, oben bei -108°C und unten bei -80°C 45
7.2 Lichtmenge als Funktion der Rauschdifferenzen 47
7.3 Spektrum der Al-K$_\alpha$-Linie 49
7.4 Spektrum der Ti-K$_\alpha$- und K$_\beta$-Linie 49
7.5 Die Peakpositionen der Al-K_α -Linie bei -108°C 50

7.6 Der CTE-Verlauf bei -108°C mit der Al-K_α-Linie 51

7.7 Ausschnitt aus Abbildung 7.6 51

7.8 Die Peakpositionen bei -80°C mit der Al-K_α-Linie 52

7.9 Die zweifach gemessenen Peaklagen. Mit Romben gekennzeichnet sind die Werte aus der ersten Meßreihe, mit Rechtecken die aus der zweiten Meßreihe. 53

7.10 Die CTE in Abhängigkeit der Lichtmenge bei -80°C 54

7.11 Die CTE-Entwicklung der beiden Meßreihen bei -80°C 54

7.12 Die Peakpositionen der Ti-K_α -Linie bei -108°C 55

7.13 Die CTE in Abhängigkeit der Lichtmenge mit dem Spektrum der Ti-K_α-Linie 55

7.14 CTE-Entwicklung mit dem Al-K_α-Spektrum bei den Temperaturen -108°C (Romben) und -80°C (Rechtecke) 56

7.15 CTE-Entwicklung nach der Normierung. Mit Romben gekennzeichnet sind die Meßpunkte bei -108°C und mit Rechtecken diejenigen bei -80°C. 57

7.16 CTE-Entwicklung bei -108° C mit den Energien der Al-K_α- und Ti-K_α-Spektren. Die Meßpunkte der Titan-Messung sind mit Rechtecken gekennzeichnet, diejenigen aus dem Aluminium-Spektrum mit Romben. 58

7.17 Ti-Spektrum mit der CTE-Korrektur aus der Flatfield-Belichtung. 60

7.18 Ti-Spektrum mit der angepaßten CTE. 60

7.19 Effektive Fläche der pn-Kamera plus Teleskop bei verschiedenen Filtern 61

B.1 Gesamtansicht der Anlage: links der Rack mit den Spannungsversorgungen, in der Mitte die Vakuumkammer mit dem Kryostaten oben, ganz rechts der Vorratsbehälter mit dem flüssigen Stickstoff 67

B.2 Die Spannungsquellen 68

B.3 Der Kamerakopf mit dem Kryostaten zum Kühlen 69

B.4 Sockel für den pn-CCD-Detektor: links der Flexlead mit der Vakuumdurchführung, rechts noch erkennbar die Blendenhalterung 70

B.5 Die Röntgenröhre aus der Sicht des Detektors: links mit der Emissionskathode auf Massepotantial und rechts das Anodenrad auf Hochspannungspotential 71

Abkürzungsverzeichnis

ABRIXAS	A Broad-band Imaging X-Ray All-Sky-Survey
ADC	Analog Digital Converter
ADU	Analog Digital Converter Unit
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CAMEX	CMOS Amplifier and Multiplexer Chip
CCD	Charge Coupled Device
CTE	Charge Transfer Efficiency
CTI	Charge Transfer Inefficiency
EPCE	EPIC Control Electronics
EPCH	EPIC Camera Head
EPDH	EPIC Data Handling Unit
EPEA	EPIC Event Analyser
EPIC	European Photon Imaging Camera
EPROM	Erasable PROM
EPVC	EPIC Voltage Control
FET	Feld Effekt Transistor
FIFO	First In First Out
FWHM	Full Width at Half Maximum
HBR	High Bit Rate Interface
IAAT	Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen
IDL	Interactive Data Language
LBR	Low Bit Rate Interface
MAXI	MPE/AIT X-Ray Imager
MIP	Minimum Ionizing Particle
MOS	Metal Oxide Semiconductor
OP	Operationsverstärker
PEP	PEP Modular Computers
PROM	Programmable Read Only Memory
RAM	Random Access Memory
RFGA	Reset First Gate Anode
RGS	Reflection Grating Spectrometer
ROSAT	Röntgen Satellit
SIF	Serial Intarface
XMM	X-Ray Multi Mirror Mission

Kapitel 1

Einleitung

Bei Experimenten am 8. November 1895 mit einer Glühkathodenröhre entdeckt Wilhelm Conrad Röntgen eine neue Art von Strahlen die feste Materie zu durchdringen vermögen. Da sie bis dato unbekannt sind, nennt er sie X-Strahlen. Er hielt jedoch seine Beobachtung geheim und arbeitete daran, die Eigenschaften dieser Strahlen zu erforschen. Am 28. Dezember 1895 war er soweit. In den Sitzungsberichten der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft, Jahrgang 1895, veröffentlicht er seine Ergebnisse unter dem Titel „Über eine neue Art von Strahlen". Die Sitzung der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft zu Würzburg am 23. Januar 1896 wurde ebenso zu einem besonderem Ereignis. Der Vorschlag des Vorsitzenden, die von Röntgen entdeckten neuen Strahlen Röntgen-Strahlen zu nennen, fand jubelnde Zustimmung. [11]

Knapp 100 Jahre später, im Juni 1990 wurde der Röntgensatellit Rosat ins All gebracht. Er erstellte eine vollständige Durchmusterung des Himmels im Bereich 0,1 bis 2 keV und entdeckte dabei mehr als 60.000 Röntgenquellen. Bereits am 28. April 1999 startete der Kleinsatellit ABRIXAS. Geplant war, mit Hilfe von ABRIXAS eine neue Durchmusterung vorzunehmen, allerdings in einem Bereich von 0.5 bis 15 keV. Leider kam es bereits kurze Zeit nach dem erfolgreichen Start und Aussetzen des Satelliten zu einer Fehlfunktion in der Stromversorgung. Damit entfällt bis auf weiteres eine neue Durchmusterung des Röntgenhimmels. Während seiner Mission hätte ABRIXAS voraussichtlich etwa 10.000 neue Röntgenquellen entdecken können, die im ROSAT Energieband durch Gas und Staub verdeckt sind. In Dezember 1999 soll der große Bruder von ABRIXAS, XMM, an Bord einer Ariane 5 starten. Sein wissenschaftlicher Ziel ist hochauflösende Spektroskopie mit abbildenden Wolter-Röntgenteleskopen. Sie erlauben eine räumliche Auflösung von 15 " (HEW). Sowohl XMM als auch ABRIXAS haben an Bord dieselben Röntgen-pn-CCD-Detektoren. Diese wurden vom Max-Planck-Institut in einem eigens dafür gegründetem Halbleiterlabor in Garching entwickelt.

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit war es einen bereits existierenden Vakuumteststand ([8],[1]) für die CCD-Detektoren in Betrieb zu nehmen und damit spezielle Eigenschaften dieser Detektoren zu untersuchen.

Kapitel 2

Das EPIC Kamera-System

Das EPIC Kamera-System (European Photon Imaging Camera) ist ein neuartiges, für den Röntgensatelliten XMM entwickeltes Röntgenstrahlen detektierendes System. Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich, ist EPIC eines der drei Instrumente auf XMM.

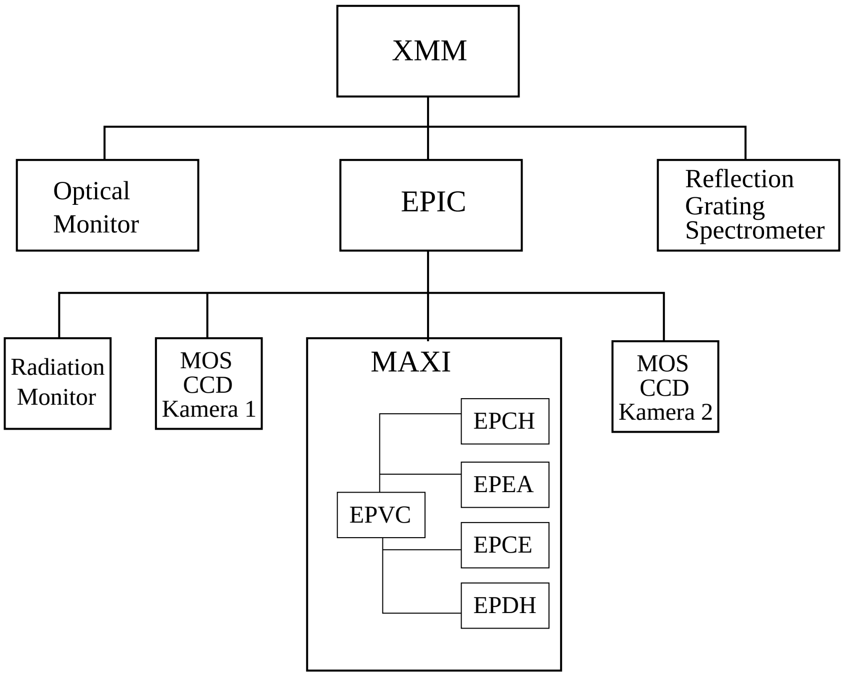


Abbildung 2.1: Die Instrumente auf XMM

Der optische Monitor erlaubt es neben der Röntgenbeobachtung auch noch Beobachtungen im optischen bzw. UV-Bereich zu machen. Dies kann gleichzeitig erfolgen. Das Reflektionsgitterspektrometer ist für hochauflösende Spektroskopie im Bereich 0.35 bis 2.4 keV gedacht.

Ein wichtiges Instrument auf XMM ist das EPIC Kamera-System. Es besteht aus drei CCD-Kameras: zwei MOS-CCDs und einem pn-CCD. Ferner gibt es noch einen Strahlungsmonitor, er hat die Aufgabe hochenergetische Teilchenstrahlung zu detektieren. Im Falle zu hoher Strahlungsflüße, wie z.B. bei solaren Flares, können Filterräder in ihre geschlossene Position gefahren werden um die CCDs zu schützen.

2.1 Der MPE/AIT X-Ray Imager MAXI

Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich ist, ist MAXI aus 5 Untersystemen aufgebaut.

Der Kamerakopf EPCH (EPIC Camera Head) enthält unter anderem das neu entwickelte pn-CCD. Außerdem beinhaltet er noch ein Filterrad, mehrere Heizelemente zur Temperaturregelung, einen Radiator für die Kühlung und ein Protonenschild. Die EPEA (EPIC Event Analyser) wurde am IAAT entwickelt, sie übernimmt die vom Detektor kommenden Rohdaten und bearbeitet sie so weit, daß sie von der EPDH (EPIC Data Handling Unit) an die Telemtrie übergeben werden können. Die EPDH ist somit ein Interface zwischen Satellitenbus und MAXI-Kamera. Sie verwaltet und koordiniert die wissenschaftlichen- und Housekeeping-Daten. Von ihr werden die von der Bodenstation kommenden Steuerkommandos empfangen, dekodiert und an die EPCE (EPIC Control Electronics) weitergegeben. Die EPCE kontrolliert die von der EPVC (EPIC Voltage Control) erzeugten Spannungen, ist zuständig für die Temperaturstabilisierung des Detektors und bildet das Kommando- und Housekeeping-Interface zur EPDH. Die EPVC erzeugt viele der Spannungen, die vom Detektor und anderen Komponenten gebraucht werden.

Genauere Beschreibungen des Kamera-Systems befinden sich in mehreren Diplomarbeiten des IAAT, z.B in [8].

2.2 Der pn-CCD-Detektor und die EPEA

Viele der in diesem Kapitel verwendeten Begriffe werden zunächst ohne weitere Erklärungen eingeführt. Die genaue Funktionsweise und Aufbau des pn-CCD-Detektors befindet sich dann in Kapitel 3. Hier soll nur ein Überblick über den Signalweg der verarbeitenden Elektronik gegeben werden.

Bei dem verwendeten Detektor handelt es sich um ein voll depletiertes pn-CCD. Der Detektor ist in vier Quadranten unterteilt, wobei jeder Quadrant aus drei CCDs aufgebaut ist. Somit besteht der gesamte Detektor aus insgesamt 12 CCDs. Obwohl der Detektor aus einem Wafer gefertigt ist, sind die Quadranten voneinander unabhängig. Sie besitzen jeweils eine eigene, ebenfalls voneinander unabhängige Steuereinheit. Somit bleibt der Detektor auch bei einem Totalausfall eines Quadranten teilweise funktionsfähig. Dies gewährleistet eine sehr gute Redundanz. Ein Überblick über die Struktur des Detektors ist aus Abbildung 2.2 auf Seite 13 ersichtlich.

Die EPEA ist das Herzstück der Datenanalyse und Verarbeitung. Folgende Hauptaufgaben werden von ihr erfüllt:

- Erzeugung der Ansteuersignale für den TIMEX und CAMEX und der Schiebepulse zum Auslesen des CCDs,
- Digitalisierung der Analogsignale des Detektors,

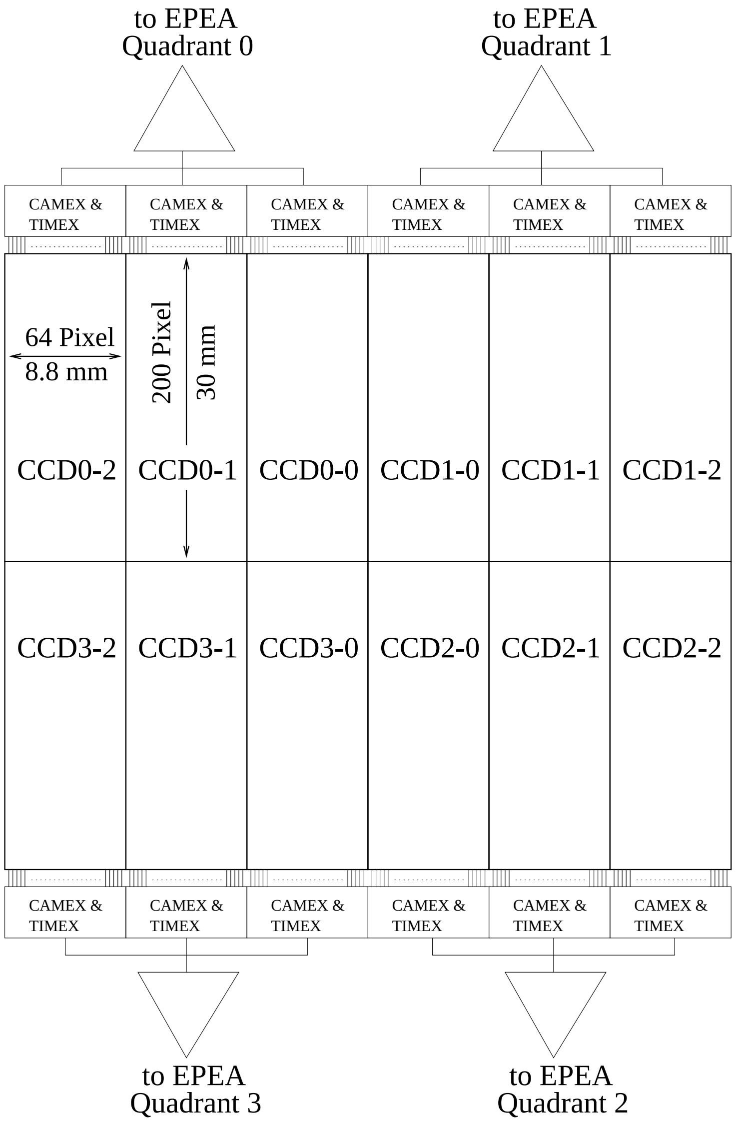


Abbildung 2.2: Das Detektor-Array

- Realisierung der Betriebsmodi des Detektors,
- Anbord-Signalverarbeiteung (siehe Kapitel 4).

Die EPEA-Box besteht aus insgesamt 9 Steckkarten: 4 CPU-Karten, 4 SECOM-Karten und einer Mastersequenzer-Karte. Jeder Quadrant hat seine eigene CPU- und SECOM-Karte. Auf der Mastersequenzer-Karte befinden sich aus Redundanzgründen zwei voneinander unabhängige Mastersequenzer-Schaltungen. Ebenfalls in der EPEA-Box befinden sich die 4 Analog-Digital-Wandler, zuständig für die Digitalisierung der vom CAMEX kommenden Analogsignale.

2.2.1 Der OP und der ADC

Für die Digitalisierung wird ein AD872 verwendet. Er hat einen Eingangsspannungsbereich von ± 1.024 V. Da der CAMEX jedoch ein Signal von $\pm$ 3.5 V liefert, ist eine Anpassung notwendig. Diese wird von einem zwischengeschaltetem OP (Operationsverstärker) vorgenommen. Ferner besitzt der CAMEX einen

Ausgangswiderstand von 1.5 kΩ. Die nachfolgende ADC-Einheit verlangt jedoch 50 Ω, diese Impedanzwandlung erfolgt ebenfalls durch den OP.

2.2.2 Die SECOM-Karte

Auf der SECOM-Karte befinden sich 3 funktionale Gruppen: der Quadrantensequenzer, der digitale Ereignis Analysator (Event Analyser) und das High-Bit-Rate-Interface HBR (High Bit Rate Interface). Der Großteil der Schaltungen ist in einem auf der Karte befindlichen ASIC (Application Specific Integrated Circuit) integriert. Die Funktionsweise des ASIC ist sehr detailliert in [7] beschrieben.

Der Quadrantensequenzer generiert die Pulsmuster für die zeitlichen Abläufe in der EPEA. Hier werden zum Beispiel die Schiebesignale des CCD und die Steuersignale für den TIMEX erzeugt.

Der Eventanalyser hat die Aufgabe, die vom ADC kommenden Signale aufzubereiten. Dazu gehören die Mediankorrektur, Unterdrückung der zu stark rauschenden Pixel, die Offsetkorrektur und die Zeilen- und Spaltenadressen-Zuordnung der Ereignisse. Die so aufbereiteten Daten werden in ein Ausgangs-FIFO (First In First Out) geschrieben.

Das HBR ist eine synchrone serielle 16-Bit-Schnittstelle. Sie ist zuständig für die Übertragung der wissenschaftlichen Daten zwischen EPEA und EPDH.

2.2.3 Die CPU-Karte

Wie der Name schon erkennen läßt, beinhaltet diese Karte die zentrale Steuereinheit der EPEA-Box, den Prozessor. Es handelt sich hierbei um einen 80C86 Mikroprozessor in einer strahlungsfesten Ausführung. Ebenfalls auf der CPU-Karte befinden sich die PROMs (Programmable Read Only Memory) mit der Software und 192 kByte Arbeitsspeicher.

Die Software der CPU-Karte ist unter anderem zuständig für die Berechnung der Offset- und Noisemaps und für die MIP-Korrektur (Minimum Ionizing Particle) und sie koordiniert den Datentransfer zwischen Ausgangs-FIFO der SECOM-Karte und dem HBR (High Bit Rate Interface). Die Daten werden vom HBR zur EPDH transportiert und anschließend zur Erde gefunkt. Weiterhin ist die CPU-Software zuständig für die Bereitstellung der Housekeeping-Daten der EPEA. Zu den Housekeeping-Daten gehören Zustands-Daten der EPEA (z.B. Temperatur- und Spannungswerte) sowie die Offset-, Rausch- und Bad-Pixel-Tabellen. Die Housekeeping-Informationen werden auf Anforderung an die EPCE (EPIC Control Electronics) übertragen. Dies geschieht über das LBR (Low-Bit-Rate Interface).

2.2.4 Der Mastersequenzer

Die Ansteuerung der einzelnen Quadranten ist Aufgabe des Mastersequenzers. Der Mastersequenzer erhält seine Kommandos von der EPCE. Diese enthalten

Informationen über die aktiven Quadranten und über die Art des Auslesens des Detektors. Die Art und Weise wie der Detektor ausgelesen wird, d.h. welcher Beobachtungsmodus Anwendung findet, wird im nächsten Kapitel dargestellt.

2.3 Betriebsmodi des Detektors

Es gibt insgesamt sechs verschiedene Betriebsmodi der pn-CCD-Kamera. Man kann sie grob in zwei Gruppen unterteilen: paralleles bzw. serielles Auslesen. Beim seriellen Auslesen werden die CCDs nacheinander ausgelesen. Die verschiedenen Modi sollen nun im Folgenden kurz beschrieben werden.

2.3.1 Der Full Frame Mode

Der Full Frame Mode gehört zusammen mit den Window Modi zur Gruppe der seriellen Modi. Beim Full Frame Mode werden alle 12 CCDs eingesetzt. Die Integrationszeit eines CCD beträgt 67.2 ms. Während der Integrationszeit eines CCD werden die anderen 11 nacheinander ausgelesen. Auslesezeit und Integrationszeit zusammen ergeben die zeitliche Auflösung des Full Frame Mode, diese beträgt 73.3 ms. Da während des Ausleseprozesses weiterhin Strahlung einfällt, werden Ereignisse in den falschen Pixel detektiert. Diese heißen Out-of-Time Ereignisse. Werden Punktquellen beobachtet, so ist eine nachträgliche Korrektur möglich. Im Full Frame Mode ist der Anteil der Out-of-Time Ereignisse festgelegt durch das Verhältnis der Auslesezeit eines Detektors zur Integrationszeit, also 6.6%.

Alle Messungen die in dieser Diplomarbeit beschrieben werden, wurden in diesem Full Frame Mode gemacht.

2.3.2 Die Window Modi

Diese Modi erlauben es, aus dem ganzen Detektorarray jeweils nur ganz bestimmte Ausschnitte zu verwenden. So gibt es den Large Window Mode und den Small Window Mode.

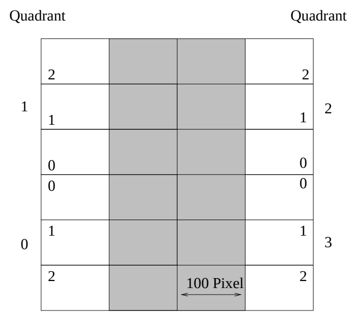


Abbildung 2.3: Large Window Mode

Wie aus Abbildung 2.3 ersichtlich,werden beim Large Window Mode nur die inneren 100 Zeilen (100-199) der CCDs verwendet. Beim Small Window Mode finden nur die inneren 64 Zeilen (136-199) des CCD 0 aus Quadrant 1 Anwendung.

Dadurch, daß nur definierte Fenster ausgewertet werden, sind die Window Modi schneller als der Full Frame Modus, da die nicht verwendeten Zeilen nur geschoben aber nicht ausgelesen werden. Die zeitlichen Auflösungen sind damit auch besser im Vergleich zum Full Frame Modus. Sie betragen 48 ms im Full Window und 6 ms im Small Window Mode.

2.3.3 Der Timing Mode

Dieser Modus dient vor allem der Untersuchung von sehr hellen Quellen, die darüber hinaus auch schnelle Intensitätsänderungen zeigen. Dieser Modus ist jedoch nur für Punktquellen geeignet. Verwendet wird in diesem Modus CCD 0 aus Quadrant 1. Dabei werden die Zeilen in Zehner-Paketen auf die Ausleseanode geschoben, d.h. es werden immer zehn Zeilen aufintegriert und zu einer sog. Makrozeile zusammengefaßt, erst dann wird ausgelesen. Dadurch verkürzt sich natürlich die Auslesezeit und man erreicht eine bessere Zeitauflösung von 0.03 ms.

2.3.4 Der Burst Mode

Ist man nur an sehr schnellen Intensitätsänderungen interessiert, so kommt der Burst Mode zum Zuge. Verwendung findet wie schon beim Timing Mode lediglich CCD 0 des Quadranten 1. Durch die spezielle Arbeitsweise besitzt der Burst Mode die größte Grenzhelligkeit und die beste Zeitauflösung von 7 μs. Bei diesem Modus wird zuerst die Quelle in den obersten Zeilen positioniert. Danach werden 200 Zeilen nur schnell geschoben, ohne die Inhalte auszuwerten. Beim schnellen Schieben verteilen sich nun die Röntgenquanten der Quelle auf die nachfolgenden 200 Zeilen. Dann wird 182 mal normal ausgelesen, wieder 200 mal schnell geschoben, normal ausgelesen usw.

Kapitel 3

Der EPIC pn-CCD Detektor

Auf den beiden Satelliten XMM und ABRIXAS werden neu entwickelte pn-CCD Röntgendetektoren eingesetzt. Der Detektor hat eine Energieauflösung von 140 eV (FWHM) bei 6.4 keV und eine Quantum-Efficiency von 99% bei 6.4 keV, 97% bei 8 keV und 88% bei 0.5 keV. Die Zeitauflösung hängt vom Betriebsmodus ab und bewegt sich somit zwischen 7 μs im Burst Mode und 280 ms im Extended Full Frame Mode [3].

In diesem Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen des pn-CCD Detektors vorgestellt, da diese für das Verstehen der Funktionsweise des Detektors sehr wichtig sind. Danach wird die auf dem Chip integrierte erste Stufe der Signalverarbeitung besprochen.

3.1 Kleine Halbleiterlehre

Materialien können bezüglich ihrer Leitfähigkeit in drei Gruppen eingeteilt werden: Leiter, Halbleiter und Isolatoren. Welches Material in welche Gruppe gehört, wird durch den Abstand zwischen dem Valenz- und Leitungsband festgelegt. So gilt für den Bandabstand:

Leiter:	$= 0$ eV
Halbleiter:	< 3 eV
Isolator:	> 3 eV

Silizium hat zum Beispiel bei 293 K eine Bandlücke von 1.12 eV.

Ein Halbleiter ist erst durch Dotierung mit 3- oder 5-wertigen Atomen für Halbleiterbauelemente brauchbar. Dabei werden Fremdatome ins Kristallgitter des Silizium eingebaut. Bei der Dotierung zum n-Leiter wird häufig das 5-wertige Phosphor als Donator bzw. zum p-Leiter das 3-wertige Bor als Akzeptor verwendet. Dadurch entsteht die bekannte p- oder n-Leitung mit Löchern bzw. Elektronen als Ladungsträgern. Aus dem Bändermodell der Festkörperphysik weiß man, daß ein Elektron nur dann zur Leitung beitragen kann, wenn es aus dem Valenzband ins Leitungsband wechselt. Dieser Übergang ist nur durch Energiezufuhr möglich.

3.1.1 Der pn-Übergang

Bringt man einen p- und einen n-leitenden Halbleiter in Kontakt, so entsteht an der Berührungsstelle eine ladungsträgerarme Zone, die sogenannte Depletionszone. Dabei diffundieren die freien Elektronen des n-Leiters in die p-Zone und rekombiniern dort mit den Löchern. Dadurch, daß die Elektronen in die p-Zone eindringen entsteht ein Elektronen-Diffusionsstrom und infolge dessen eine negative Raumladung.

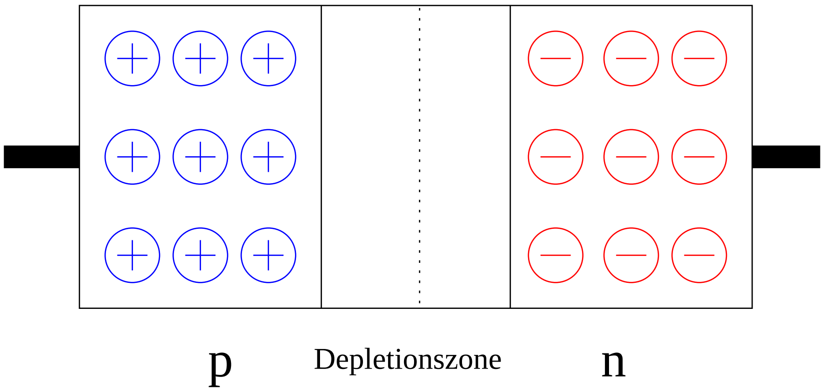


Abbildung 3.1: Der pn-Übergang

Diese Ladungsverteilung in der Depletionszone erzeugt einen dem Diffusionsstrom entgegengerichteten Feldstrom. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem sich beide Ströme kompensieren. Die Kontaktzone verarmt sehr stark an beweglichen Ladungsträgern, so daß eine hochohmige Sperrschicht entsteht.

Schaltet man eine positive Spannung an den n-Leiter und eine negative Spannung an den p-Leiter (Sperrpolung), so wird sich die Breite der Sperrschicht (Depletionszone) mit steigenden Spannungswerten vergrößern. Der Widerstand der Sperrschicht nimmt daher zu. Umgekehrt bewirkt eine positive Spannung am p-Leiter und eine negative am n-Leiter (Durchgangspolung) eine Verschmälerung der Sperrschicht. Der Widerstand der Sperrschicht wird infolge dessen abnehmen.

3.2 Das pn-CCD

Wird in der Depletionszone elektromagnetische Strahlung absorbiert, so werden dort Elektron-Loch-Paare (freie Ladungen) erzeugt. Diese können dann von der angelegten Spannung abgesaugt werden, im Stromkreis fließt kurzzeitig ein kleiner Strom. Die erzeugten Elektronen können aber nur dann nachgewiesen werden wenn ihre Energie ausreicht um die Bandlücke des Siliziums zu überwinden. Obwohl bei Silizium die Bandlücke bei 1.12 eV liegt, wird im Mittel ein Elektron-Loch-Paar erst ab einer Photonenenergie von 3.68 eV erzeugt. Dies liegt daran, daß zur Ladungserzeugung noch ein weiterer konkurrierender Effekt, die Gitterschwingungen, auftritt. Somit muß zusätzlich zum Bandenabstand Phonenenergie aufgebracht werden.

Weiterhin stellt man fest, daß die Menge der erzeugten Ladungen direkt proportional zur Energie der absorbierten Strahlung ist. Das Messen der Gesamtladungsmenge, erzeugt durch die Absorption eines Einzelphotons, gestattet also eine Energiebestimmung des Photons.

3.2.1 Die Seitwärtsdepletion

Mit dem pn-CCD-Detektor wird Röntgenstrahlung im Bereich von etwa 0.1 bis 15 keV detektiert. Die Absorptionslänge der Photonen hängt von deren Energie ab, d.h. mit zunehmender Energie nimmt die Absorptionslänge ebenfalls zu. Um ein möglichst großes Nachweisvolumen zu haben, wird im Halbleiter nicht ein pn-Übergang, sondern ein pnp-Übergang verwendet. Durch das Anlegen entsprechend berechneter Spannungen an die p-Elektroden wird somit das Depletionsgebiet auf die ganze Tiefe und Breite des n-dotierten Grundmaterials erweitert (siehe Abb. 3.2).

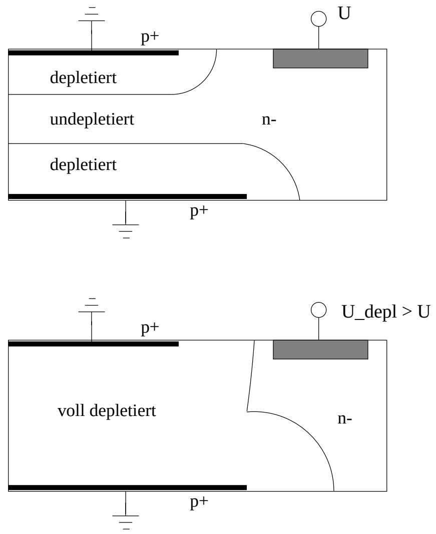


Abbildung 3.2: Die Depletion

Vorausgesetzt, daß an den p^+-Elektroden dasselbe Potential anliegt, bildet sich ein Potentialminimum genau in der Mitte des n-Halbleiters. Durch unterschiedliche Potentiale kann die Lage des Minimums gesteuert werden.

3.2.2 Pixelstruktur des Detektors

Zusätzlich zur Energiebestimmung ist auch eine Ortsauflösung mit dem Detektors möglich. Ziel ist daher die Erzeugung einer Pixelstruktur sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung. Die Kreuzungspunkte in Abbildung 3.3 symbolisieren diese Pixel.

Um dies zu erreichen, wird als erstes die eine Seite des Detektors, die Rückseite, komplett und homogen mit einer p^+-Schicht versehen. Dies wird dann als Rückkontak bezeichnet. Die Rückkontaktspannung U_{RK} wird so eingestellt, daß sich das Potentialminimum direkt unter der Vorderseite des Detektors ausbildet. Die andere Seite, die Vorderseite, wird mit einer p^+-Schicht in Streifenform versehen. Wie in Abb. 3.4 zu erkennen ist, liegen an diesen Streifen die sogenannten Phi-Spannungen.

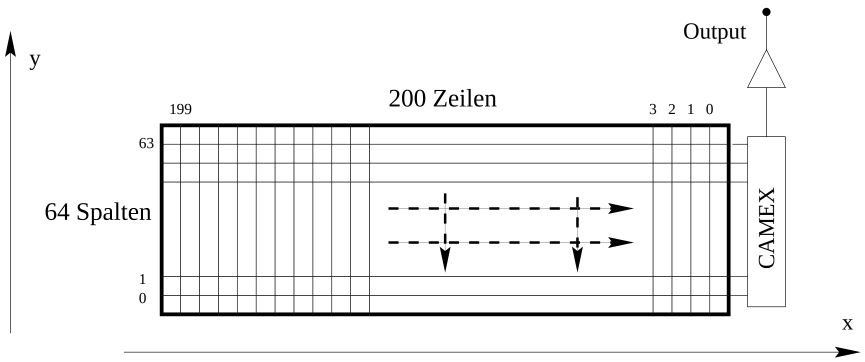


Abbildung 3.3: Die Pixelstruktur

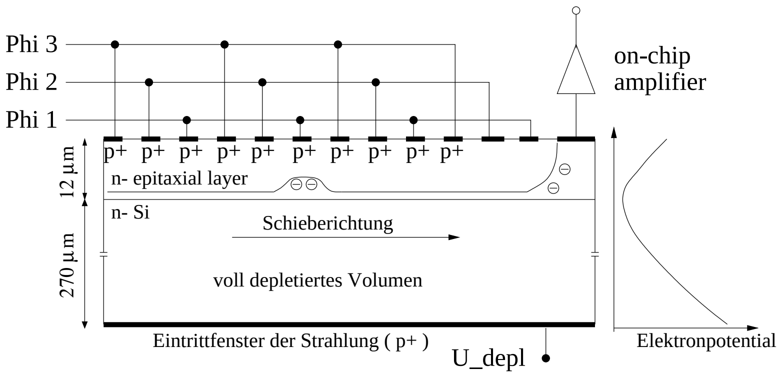


Abbildung 3.4: Die Phi-Pulse

Durch anlegen unterschiedlicher Phi-Spannungen bilden sich unter den p^+-Elektroden Potentialtöpfe aus (siehe dazu Abb. 3.5). Die einzelnen Pixel werden in horizontaler Richtung aus jeweils 3 p^+-Streifen gebildet. Ein p^+ Streifen hat eine Breite von 50 μm, daraus resultiert in horizontaler Richtung eine Pixelabmessung von 150 μm. Zum Transport der Ladungen werden die Phi-Spannungen zeitlich variiert, dadurch ergibt sich ein Schieben in Richtung der Ausleseanode. Wie funktioniert nun das Schieben?

Betrachten wir dazu den zeitlichen Verlauf in Abbildung 3.5. Angenommen, die gesammelten Ladungen befinden sich in dem durch Φ_1,Φ_2 und Φ_3 erzeugten Potentialtopf (Zeitpunkt t_0). Zum Transport nach rechts muß daher Φ_1 tiefer stehen als Φ_2. Wird nun Φ_1 abgesenkt und Φ_2 angehoben, so können die Ladungen nach rechts abfließen (Zeitpunkt t_1). Dabei darf jedoch die Anhebung von Φ_2 nicht höher Ausfallen als Φ_3, da sonst die Ladungen anstatt nach rechts auch nach links fließen würden. Damit befinden sich die Ladungen die vorher im Potentialtopf definiert durch Φ_1,Φ_2 und Φ_3 waren nun im Potentialtopf definiert durch Φ_2,Φ_1 und Φ_3 (Zeitpunkt t_2). Die bis jetzt ausgeführten Schritte entsprechen also einem Transport um ein drittel Pixel, da ja ein Pixel durch drei Phi-Register definiert wird. Eine zweifache Wiederholung obiger Prozedur einmal mit Φ_1 und

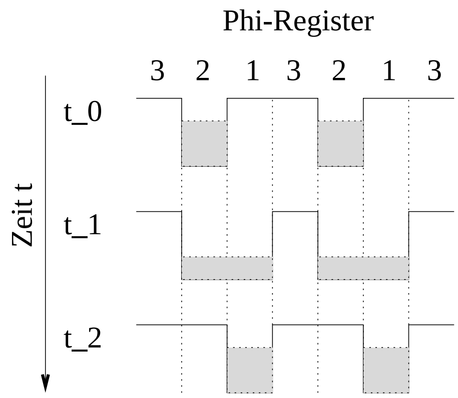


Abbildung 3.5: Das Schieben

Φ_3 dann mit Φ_3 und Φ_2 ergibt, daß eine Ladungsmenge die vorher in Pixel n war nun sich in Pixel n-1 befindet. So werden also die Ladungen Pixel für Pixel in Richtung Ausleseanode geschoben, dort ausgelesen und weiter verarbeitet.

In der zweiten Dimension, in vertikaler Richtung, ist die Pixelbildung etwas einfacher, denn in dieser Richtung wird ja nicht geschoben. Dazu werden mit Hilfe von Ionenimplantation Streifen parallel zur x-Richtung (Abb. 3.3) gebildet. Diese Implantationen (n-Channel-Guide) erzeugen Raumladungszonen, die für die Elektronen Potentialbarrieren darstellen. Dadurch sorgen sie dafür, daß die Ladungen nicht in eine andere Spalte abfließen können. Aus Gründen der Symmetrie sind diese Channel-Guides auch 150 μm breit. Damit ergeben sich auf dem Detektor wohl definierte Orte (= Pixel) der Größe 150μm $\times$ 150μm, die eine gute Ortsauflösung gestatten. Der Breite 150 μm entsprechen bei der 7.5 m Brennweite der XMM-Spiegel 4.1 Bogenminuten am Himmel.

3.3 Die on-chip Signalverarbeitung und der CAMEX

Wurden nun Ladungen in den Pixeln gesammelt, so wird jede der 200 Zeilen sequenziell auf die Ausleseanoden geschoben. Dabei werden alle 64 Pixel einer Zeile auf einmal transportiert. Von hier aus muß die gerade anliegende Zeile schnell weiterverarbeitet werden, um für die nächste der 200 Zeilen Platz zu machen. Die Zeit in der alle Zeilen eines CCD ausgelesen werden, heißt Auslesezeit und hängt vom gerade verwendetem Modus ab. Die erste Stufe der analogen Signalverarbeitung wird von einem hochintegrierten anwenderspezifischen Schaltkreis (ASIC) übernommen, dieser heißt CAMEX. Er hat vor allem die Aufgabe das Anodensignal zu verstärken, eine Rauschfilterung vorzunehmen und das so bearbeitete Signal dem nachfolgendem Analog-Digital-Wandler (ADC) zur Verfügung zu stellen. Ein Blockschaltbild des CAMEX wird in Abb. 3.6 gezeigt.

Aufgrund der Komplexität des Aufbaus und der Arbeitsweise des CAMEX möchte ich an dieser Stelle nur seine grobe Funktionsweise beschreiben. Eine sehr detaillierte Beschreibung befindet sich jedoch für Interessierte in der Diplomarbeit

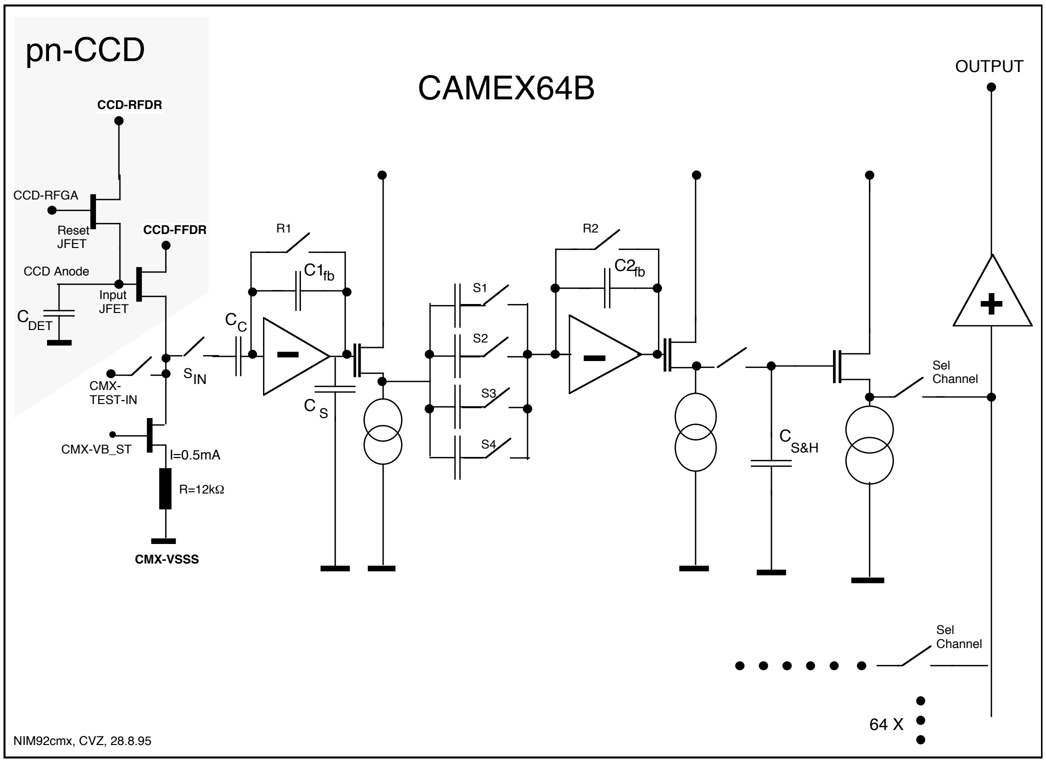


Abbildung 3.6: Blockschaltbild des CAMEX

von Richard Martini [9].

Wie in Abbildung 3.3 angedeutet, befindet sich der CAMEX in unmittelbarer Nähe des Detektors. Die 64 Eingangskanäle des CAMEX sind über Bonddrähte mit den 64 Ausganskanälen des Detektors verbunden. Würde nun der Ladungsinhalt einer Anode auf einen Bonddraht geschoben werden, würde die Eigenkapazität dieser Verbindung die sehr geringe Signalhöhe einbrechen lassen. Aus diesem Grund befindet sich noch auf dem Silizium-Wafer des pn-Detektors ein Vorverstärker, der „First FET” (Feld Effekt Transistor). Erst nachdem das Anodensignal verstärkt wurde, wird es über die Bonddrähte dem CAMEX zugeführt. In Abbildung 3.6 ist diese Vorverstärkungsstufe im grau unterlegten Bereich links oben zu sehen. Dann wird das Signal in einem weiteren Schritt verstärkt, offsetkorrigiert, nachverstärkt und schließlich auf den Ausgang gelegt. Das Baseline-Sampling ist notwendig, da beim Schieben kontinuierlich Ladungen auf die Anode geschoben werden und dadurch die Spannung ständig ansteigt. Bevor also mit der Verarbeitung des an der Anode liegenden Signals begonnen wird, muß die dort schon vorhandene Spannung bestimmt werden. Hinterher wird dann dieser Offset abgezogen, so daß an die nächste Stufe der Signalverarbeitung der wirkliche Pixelinhalt weitergegeben wird. Um mit der Zeit ein Überlaufen der CCD-Anode zu vermeiden, besteht die Möglichkeit den „Inhalt” zu löschen. Dies geschieht mit Hilfe des RFGA-Signals (Reset First Gate Anode).

Um den Signaltransport im CAMEX sicherzustellen, müssen die dort befindlichen Schalter in einer ganz bestimmten zeitlicher Reihenfolge betätigt werden. Diese Aufgabe übernimmt der TIMEX, der Steuer-ASIC des CAMEX. Eine sehr detaillierte Beschreibung des TIMEX befindet sich ebenfalls in [7].

Kapitel 4

Eigenschaften des CCD-Signals

Das im Detektor primär erzeugte Signal ist eine gewisse Anzahl von Elektronen, die proportional zur Energie der absorbierten Strahlung ist. Das Auslesen der Information ist ein sehr komplexer Vorgang. Es ist leider unvermeidbar, daß dabei das ursprüngliche Signal in gewissen Grenzen verfälscht wird. Um diese Einflüsse korrigieren zu können, ist eine genaue Kenntnis der Funktionsweise der signalverarbeitenden Elektronik unerläßlich. Dabei gibt es eine Vielzahl von Effekten zu berücksichtigen. Bei der Vorstellung und Beschreibung dieser Eigenschaften des Signals werde ich mich jedoch auf diejenigen beschränken, die entscheidend in die Messungen eingehen, die in dieser Diplomarbeit gemacht wurden.

4.1 Der Offset

Der Offset eines Detektors ist per Definition dasjenige Ausgangssignal, das der Detektor auch ohne eine Eingangsgröße liefert. Man bezeichnet es auch als Dunkelstrom. Auch beim pn-CCD-Detektor ist dies nicht anders. Allerdings liefert nicht nur das Pixel des Halbleiterdetektors einen Offset. Auch die nachfolgende Verarbeitungselektronik trägt einen Beitrag zum Gesamtoffset bei, dieser bildet sogar den Großteil des Gesamtoffsets. Insgesamt setzt sich dann der Gesamtoffset aus folgenden additiven Größen zusammen:

- Offset der einzelnen Pixel des CCDs,
- Offset der 64 First-FETs auf dem CCD,
- CAMEX-Offset,
- Offset des Operationsverstärker zwischen CAMEX und EPEA,
- ein konstanter digitaler Offset der EPEA-BOX.

Schon erste Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß der Hauptanteil von den 64 Verstärkerstufen (First-FET) des CAMEX stammt. Ferner hängt der Offset stark von der Temperatur ab [4]. Aus diesem Grund muß die Temperatur während einer Messung in einem engen Bereich von etwa 0,2 Grad gehalten werden. Für die Offsetkorrektur wird vor jeder Messung eine sog. Offsettabelle berechnet und in der EPEA gespeichert. In so einer Tabelle steht dann für jedes

Pixel dessen Gesamtoffset. Während einer Beobachtung wird vom Signal jedes einzelnen Pixels dieser abgespeicherte Wert abgezogen. Die Offsetkorrektur der Daten geschieht bereits auf dem Satelliten. Das Bild einer typischen Offsetverteilung gibt Abbildung 4.1 wieder.

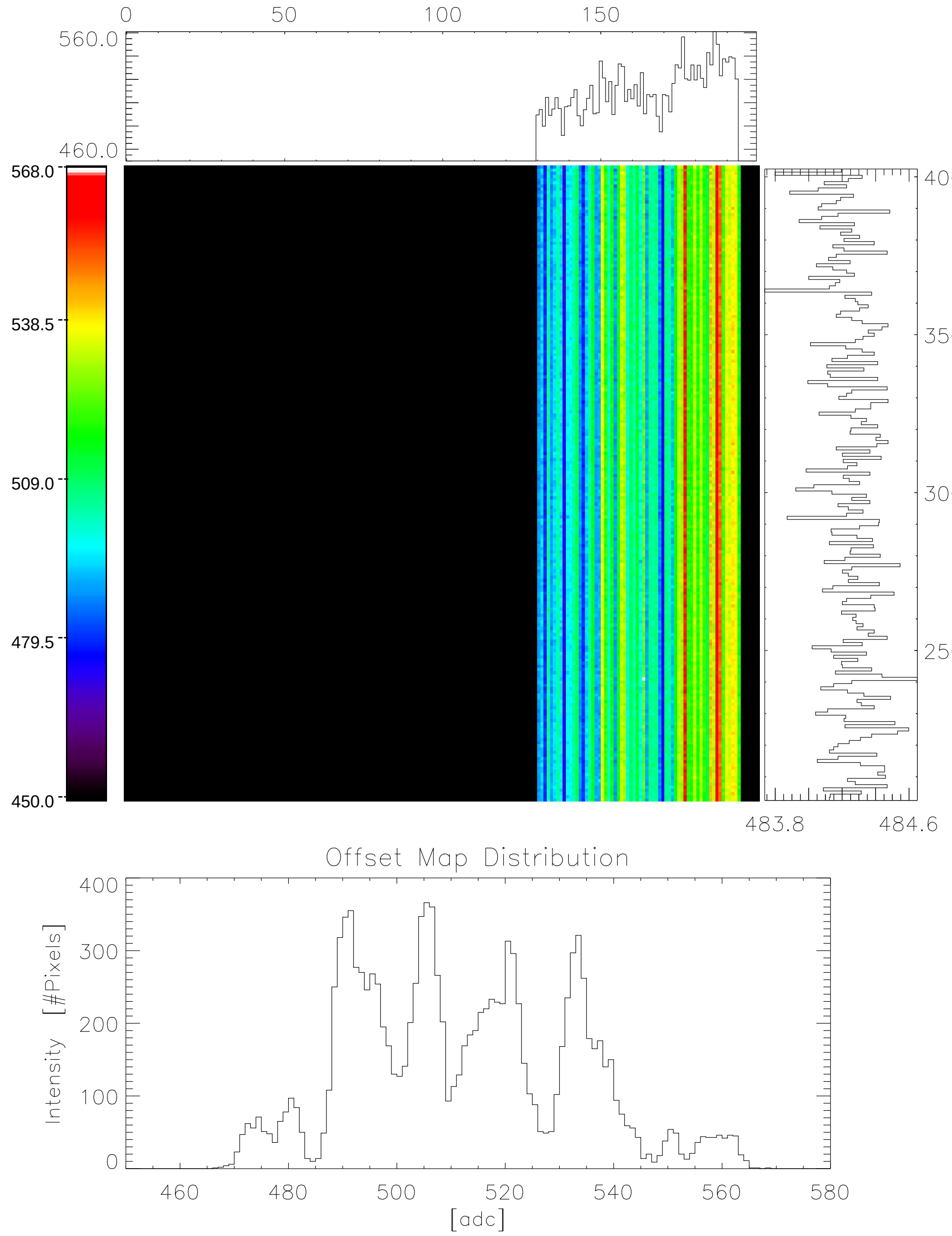


Abbildung 4.1: Typische Offsetverteilung

4.2 Das Rauschen (Noise)

Auch das Rauschen ist eine additive Größe und hat seinen Ursprung in denselben Komponenten wie der Offset. Hinzu kommen noch:

- Die Schwankungen des FFDR-Stromes der Ausleseanode.
- Das CTE-Rauschen.

Analog zur Offsetkarte kann auch eine Rauschkarte berechnet werden. Dabei wird jedes offsetkorrigierte Pixel n mal ausgelesen und aus diesen Werten eine Standardabweichung berechnet. Genauso wie der Offset, ist auch das Rauschen temperaturabhängig [4]. Das typische Bild einer Rauschverteilung ist in Abbildung 4.2 wiedergegeben.

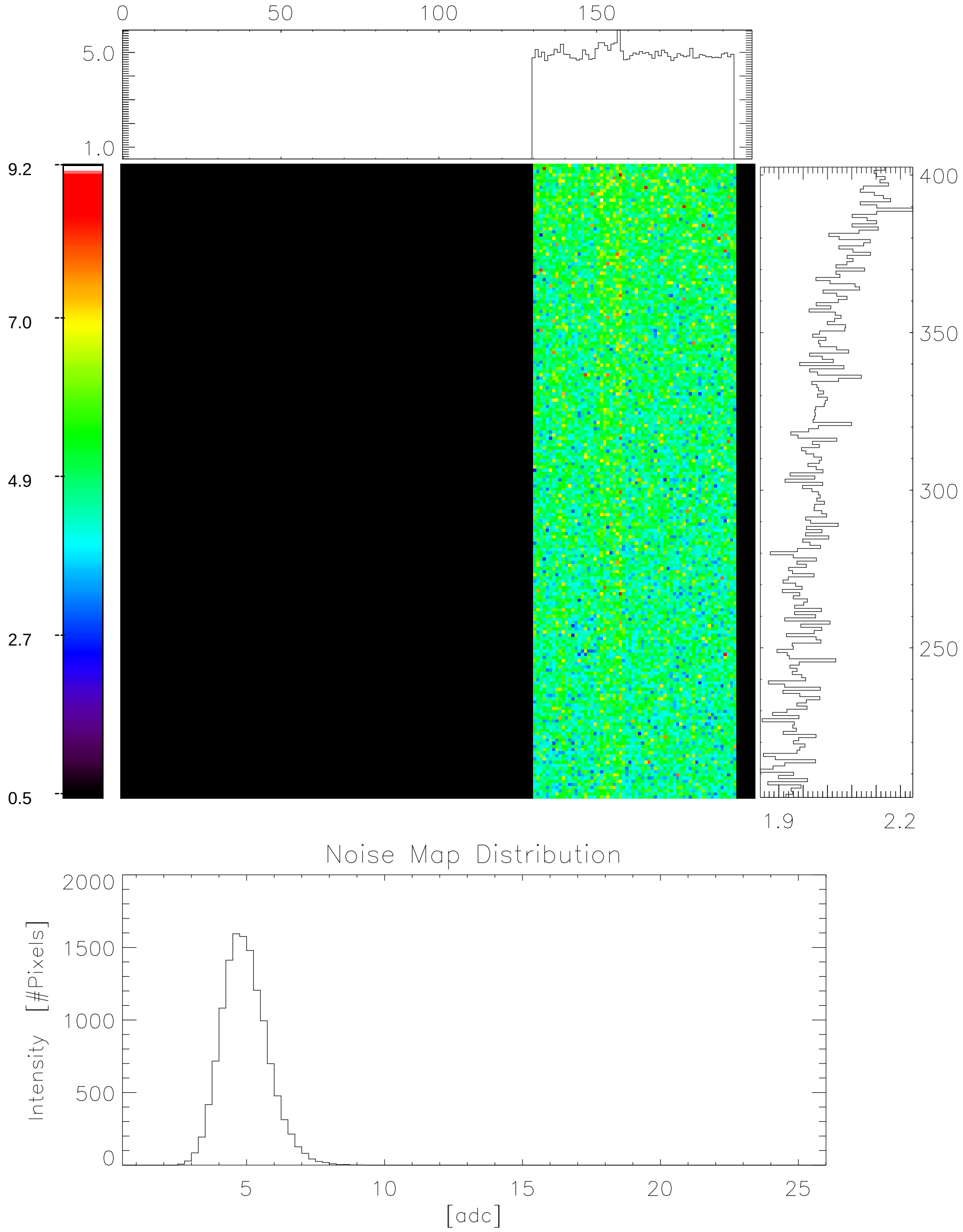


Abbildung 4.2: Typische Rauschverteilung

4.3 Die Verstärkung (Gain)

Wie in Kapitel 3.3 gesehen, besitzt der CAMEX 64 Eingangsstufen die die erste Verstärkung vornehmen. Aus produktionstechnischen Gründen besitzen die 64 First-FET leicht unterschiedliche Verstärkungskennlinien. Dadurch ergibt sich in den Kanälen eine um bis zu fünf Prozent voneinander abweichende Verstärkung. Diese Abweichung verfälscht das Signal und muß daher korrigiert werden. Diese Korrektur heißt Gain-Korrektur und läßt sich recht einfach durchführen. Dazu wird aus einer Flatfield-Belichtung die Peaklage einer ausgewählten Linie für jeden der 64 Kanäle bestimmt. Aus diesen 64 Werten wird dann ein Mittelwert bestimmt. Das Verhältnis der Einzelwerte zum Mittelwert erlaubt nun eine Aussage darüber, welcher Kanal stärker oder schwächer verstärkt. Trägt man nun diese 64 Werte in einem Diagramm als Funktion der Kanalnummer (Spaltennummer) auf, so ergibt sich Abbildung 4.3. Genauso wie der Offset und das Rauschen

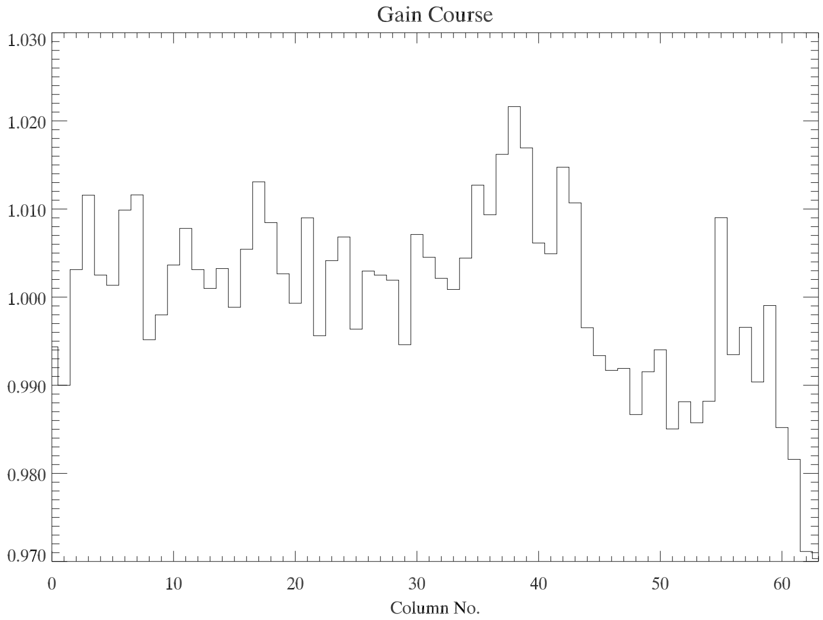


Abbildung 4.3: Verstärkungskarte eines CCDs

ist die Gain auch temperaturabhängig und muß daher für jede neu eingestellte Temperatur neu bestimmt werden. Da auch eine schwache Energieabhängigkeit besteht [6], gilt ähnliches für jede Energie. [1]

Nicht verwechseln darf man an dieser Stelle obige Gain-Verstärkung mit der Gesamtverstärkung des Detektors. Während die Gain durch die Spaltenstruktur geprägt wird, gibt die Verstärkung des Detektors an, wie der Zusammenhang zwischen der Energie und der Anzahl der ADC-Kanäle aussieht. Also stellt die Verstärkung eine Art Umrechnungsfaktor zwischen den beiden Größen dar. So beträgt die Verstärkung bei -108°C etwa 0.19 ADU/eV.

[1] Die Gain in Abb. 4.3 wurde beispielsweise bei $-108°$C mit der Energie 1.48 keV der Al-K-Linie aufgenommen.

4.4 Die CTE

Neben der Gain, ein spaltenabhängiger Effekt, gibt es auch einen zeilenabhängigen, die CTE. Die CTE steht als Abkürzung für <u>C</u>harge <u>T</u>ransfer <u>E</u>fficiency und sagt etwas über die Güte des Ladungstransports aus. Definiert ist sie als:

$$CTE = \frac{Q_{Zeile(i+1)}}{Q_{Zeile(i)}} \tag{4.1}$$

Wie effektiv das Schieben ist, genauer gesagt, wie viele der erzeugten Ladungen überhaupt an der Ausleseanode ankommt, hängt ganz entscheidend von der Qualität des Halbleitermaterials und von der Temperatur des Detektors ab.

Da kein Halbleiter 100%-ig perfekt hergestellt werden kann, gibt es im Halbleitermaterial Störstellen. Diese Störstellen haben ihren Ursprung in Gitterfehlstellen oder Einlagerungen von Fremdatomen. Durch das sog. Healing bei 900 °C besteht die Möglichkeit diese Verunreinigungen gleichmäßiger zu verteilen. Diese Störstellen dienen sind Einfangszentren für Elektronen. Wird nun ein gewisser Anteil der erzeugten Elektronen von diesen Zentren eingefangen, so fehlen sie natürlich in der beobachteten Energie-Linie (man erinnere sich an 3.2, Ladung $\sim$ Energie). Dieses Fehlen wirkt sich im Spektrum einer Punktquelle durch eine Verschiebung in Richtung auf kleinere Energien aus.

Um die CTE zu bestimmen, wird zunächst eine Flatfield-Belichtung vorgenommen. Um eine möglichst gute Statistik zu erhalten, werden jeweils 5 Zeilen zusammengefaßt und in so einem 5-er Block die Peaklage mit einem Gaussfit bestimmt. Damit ergeben sich 40 Werte für die Peaklagen in den entsprechenden Blöcken. An diese 40 Werte wird eine lineare Funktion gefittet, deren Steigung die CTE angibt. So eine Darstellung befindet sich in Abbildung 4.4. Die neuesten Detektoren der sog. 9'er Reihe haben in der Regel eine CTE von 0.999xxx, d.h. eine Abweichung ist erst an der 4-ten Nachkommastelle zu beobachten. Für die Messungen zu dieser Diplomarbeit wurde der Detektor mit der Bezeichnung C9-8-8 verwendet. Dieser hat schon annähernd die Eigenschaften einer Flugversion. Die Berechnung der CTE bei der Energie 1.48 keV der AL-K-Linie bei einer Temperatur von -110 °C ergab einen Wert von 0.999707 [Abb.4.4].

Man kommt zunächst leicht in die Versuchung ein Ergebnis von 0.999xxx auf 1 aufzurunden. Rechnet man aber diesen an sich geringen Fehler auf das gesamte CCD hoch, ergibt sich eine Fehlladung in Prozentbereich! Dies zeigt auch folgende Rechnung:

Angenommen, in jedem der 12800 Pixel wird durch eine gleichmäßige Bestrahlung 1 Elektron erzeugt. Das wären dann bei einer CTE gleich 1 genau 12800 detektierte Elektronen. Zum Auslesen wird aber Zeile 0 einmal und Zeile 199 genau 200-mal in Richtung Ausleseanode geschoben. Je öfter eine Zeile, und damit alle 64 Spalten in die eine Zeile untergliedert ist, geschoben wird, umso mehr Verluste erleiden die Signalelektronen der entprechenden Zeile. Rechnen wir nun mit der CTE = 0.999707. Aus Zeile 0 ergeben sich keine Verluste, so daß alle 64 (da 64 Spalten) Elektronen daraus detektiert werden. Für Zeile 10 z.B. gilt: $Q_{10} = 64 \times Q_0 \times (CTE)^{10}$. Da Q_0 die erzeugten Ladungen in einem Pixel definiert und bei dieser Rechnung als gleich 1 definiert ist, ergibt sich für die Anzahl der nachgewiesenen Ladungen eines kompletten CCDs:

$$64 \times (CTE) \times [(CTE)^0 + (CTE)^1 + (CTE)^2 + ... + (CTE)^{199}] = 12430$$

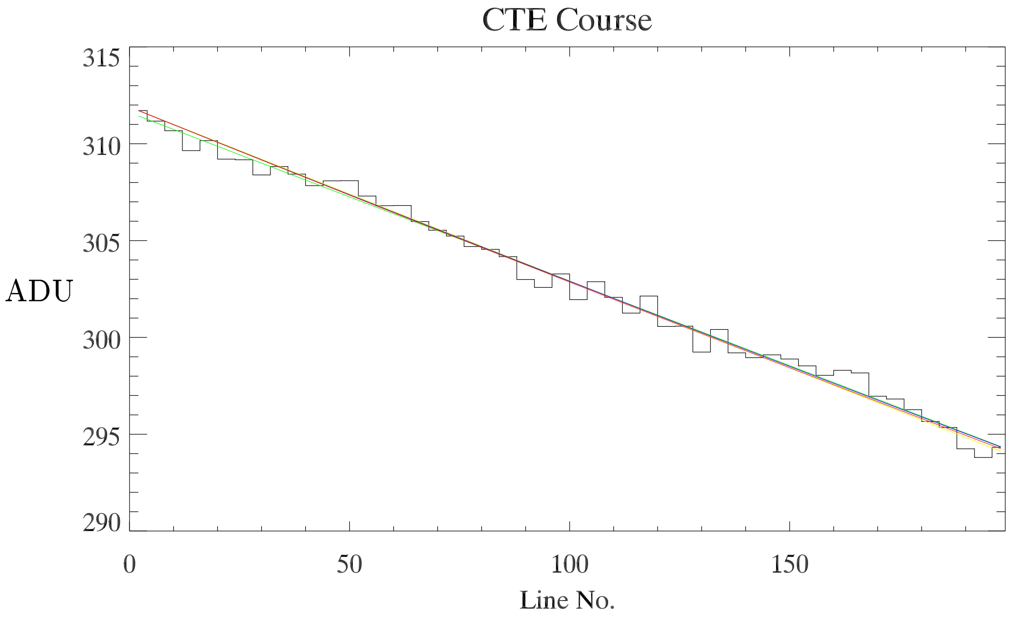


Abbildung 4.4: CTE-Verlauf eines CCDs

Dies bedeutet immerhin ein Defizit von 2.89 % der ursprünglich erzeugten Ladungsmenge!

Zu beachten ist ferner, daß die CTE von einer Reihe von Faktoren beeinflußt werden kann. So ist sie unter anderem abhängig von:

- Temperatur
- Bestrahlungsrate
- Halbleiter-Material
- Integrationszeit
- Rückkontakt- und Phi-Spannungen.

Nicht zu vernachlässigen sind mit voranschreitender Einsatzdauer die Einwirkungen von Strahlungsschäden, die vorwiegend durch Protonen, γ-Strahlen und Alpha-Teilchen-Einfall entstehen [10].

Kapitel 5

Die Vakuumtestanlage des IAAT

Im Frühjahr 1996 wurde in der Sternwarte des IAAT damit begonnen, eine neue Testanlage für die pn-CCD-Röntgendetektoren aufzubauen. Im Vergleich zur alten Anlage im Hofgebäude des IAAT sollte die neue zwei wichtige Verbesserungen enthalten:

- Betrieb eines ganzen CCD-Arrays
- Röntgenquelle mit variabler Energie und Rate

Da die neue Testanlage bei Beginn dieser Diplomarbeit bereits weitestgehend aufgebaut war, beschränke ich mich auf eine grobe Beschreibung. Für den interessierten Leser sei auf die Diplomarbeit von Markus Kuster [8] hingewiesen. Wie

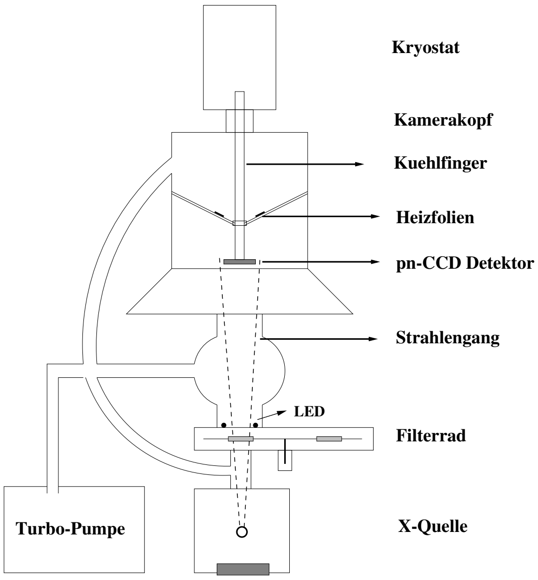


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau der Anlage

man am schematischen Aufbau in Abbildung 5.1 erkennen kann, befindet sich der pn-CCD-Detektor im oberen Teil des Testaufbaus im sog. Kamerakopf. Die Röntgenquelle ist ganz unten zu erkennen. Ferner besteht noch die Möglichkeit, verschiedene Filter in den Strahlengang zu drehen, um die Bremsstrahlung zu minimieren. Eine detaillierte Beschreibung des Filterrades befindet sich in der Diplomarbeit von Martin Bertsch [1].

5.1 Die Röntgenquelle und das Filterrad

Um die Detektoreigenschaften in einem möglichst weitem Energiebereich untersuchen zu können, wird eine Multitarget Röntgenröhre verwendet. Sie wurde uns vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching zur Verfügung gestellt.

Die Röntgenröhre enthält 18 verschiedene Targets, die alle auf einer Drehanode angeordnet sind. Das ganze ist dann über einen Vakuumflansch so montiert, daß ein Verdrehen des Targetrades gut von außen zu bewerkstelligen ist. Die Verbindung zwischen Anode und Drehteller ist nichts anderes als ein Kupferzylinder der mit einem Kunststoffübergangsstück gegen Masse isoliert ist. Am äußeren Teil ist der Drehteller befestigt, er dient auch als Anschluß für die Hochspannung.

Die aus der Kathode emittierten Elektronen treffen auf der ausgewählten Anode auf und erzeugen die gewünschte Röntgenstrahlung. Diese wird dann in Richtung Detektor emittiert. Dabei wird jedoch nur ein sehr kleiner Prozentsatz der kinetischen Energie der Elektronen in Strahlung umgesetzt, der Rest wird durch den Abbremsprozeß in Wärme verwandelt. Aus diesem Grund muß die Anode ausreichend gekühlt werden. Die Anode hat eine metallische Verbidung zum Drehteller, somit kann die Wärme bis zum Drehteller geleitet werden. Da der Drehteller sich außerhalb des Vakuums befindet, kann er mit Hilfe eines Ventilators gekühlt werden.

5.1.1 Das Filterrad

Das Filterrad dient sowohl zum Schwächen des Bremsstrahlspektrums als auch zum Abblocken von optischem Licht der Glühkathode. Dabei muß bei der Filterwahl auch noch dessen Lichtundurchlässigkeit sichergestellt werden. So läßt zum Beispiel ein Magnesium-Filter von 12.5 μm Dicke schon sehr viel optisches Licht durch. Dagegen ist ein Aluminium-Filter der Dicke 6 μm absolut lichtdicht.

Das Filterrad wurde uns vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik aus Garching zur Verfügung gestellt. Das Rad hat 16 Filtereinsätze, von denen nicht alle bestückt waren. Infolge dessen hat sich bei den ersten Messungen herausgestellt, daß Licht von der Glühkathode zum Detektor gelangen kann. Das Licht konnte entweder durch die leeren Filterpositionen oder am Rande des Filterrades durchkommen. Aus diesem Grund wurden in die beiden Vakuumflansche, unterhalb bzw. oberhalb des Rades, Lichtfallen eingebaut. Wie in Abbildung 5.2 [1] erkennbar, sitzen diese Lichfallen sehr dicht über bzw. unter dem Filterrad. Sie weisen im Inneren Rippen auf. Damit kann das Licht nur unter einem sehr spitzem Winkel eintreten, so daß es an den Rippen der Innenwand absorbiert wird. Außerdem wurden die noch leeren Positionen jeweils mit einem Aluminium-shutter verschlossen. Messungen haben dann bestätigt, daß von der Glühkathode kein Licht mehr zum Detektor durchkommen kann.

[1] Die Skizze ist stark vereinfacht und nicht maßstabsgetreu, sie soll nur das Prinzip verdeutlichen.

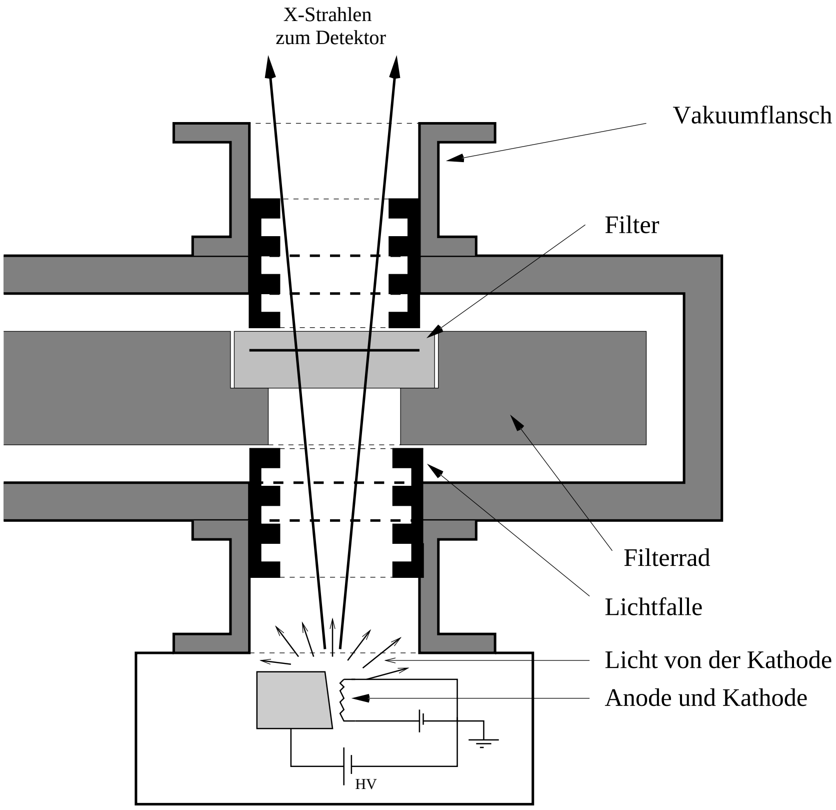


Abbildung 5.2: Prinzip der Lichtfalle

5.2 Die Vakuumanlage

Der pn-CCD-Detektor wurde für Einzelphotonen-Messungen im niederenergetischen Röntgenbereich von 0.15 keV bis etwa 15 keV konzipiert. Dies ist nur dann möglich, wenn das thermische Rauschen des Detektors soweit wie möglich minimiert wird. Durch eine Kühlung des Detektors bis zu -130°C kann diese Bedingung erfüllt werden. Würde der Detektor im gekühlten Zustand an der Luft betrieben werden, würde er aufgrund der Luftfeuchtigkeit sofort vereisen. Aus diesem Grund muß man in der Testanlage ein Vakuum mit Drucken kleiner als 10^{-6} mbar erzeugen. Die Verwendung einer Hochvakuum-Pumpe ist daher unerläßlich. Zum Einsatz kommt eine ATS 100 Hybridpumpe der Firma Alcatel. Der erreichbare Minimaldruck bei einem Volumen von 100 Litern beträgt etwa 10^{-8} mbar.

Wird die Pumpe eingeschaltet, so wird zuerst die Vorpumpe in Betrieb genommen. Damit wird erst einmal ein Vorvakuum erzeugt. Nach einer einstellbaren Zeit (zur Zeit 200 Sekunden) schaltet sich die Turbo-Pumpe ein. Bereits nach einer Stunde kann ein Druck von etwa 10^{-4} mbar erreicht werden. Für Messungen wird jedoch ein Druck von etwa 10^{-6} mbar oder kleiner vorausgesetzt. Erreicht wurde ein Druck in der Größenordnung 10^{-7} mbar. Voraussetzung ist aber ein sauberes Arbeiten innerhalb der Vakuumkammer, da jede Verschmutzung, jeder Fingerabdruck, die Leerpumpzeit der Kammer in nicht unerheblichem Maß verlängern würde. Aus diesem Grund ist ein Heizband um die Vakuumanlage gewickelt, mit Hilfe dessen die Innenfläche des Aufbaus ausgeheizt werden kann. Dadurch lösen sich Verunreinigungen wie Feuchtigkeit besser und schneller von der Oberfläche. Stand die Anlage längere Zeit offen so ist ein Ausheizen bei etwa 100 bis 120 Grad über einen Zeitraum von mehreren Tagen sinnvoll.

5.3 Die Kühlung

Wie am Anfang des vorangegangenen Abschnittes 5.2 angedeutet wurde, wird der Detektor im gekühlten Zustand betrieben. Die Kühlung erfolgt mit flüssigem Stickstoff.

Oben auf der Anlage ist ein Kryostat montiert (siehe Abb. 5.1). Dieser Kryostat besteht aus einem Dewar-Gefäß und einem Kühlfinger. Das obere Ende des Kühlfingers wird von dem flüssigem Stickstoff im Dewar-Gefäß vollständig zugedeckt, so daß er dadurch gekühlt wird. Über den Kühlfinger wird die Kälte bis zum Detektor geleitet. Der Dewar-Behälter umfaßt ein Volumen von 2 Litern und wird über eine automatische Nachfülleinheit aus einem 60 Liter Vorratsbehälter mit flüssigem Stickstoff versorgt. Wird zum Beispiel eine Detektor-Temperatur von $-108°C$ eingestellt (siehe dazu Abschnitt 5.3.1), ergibt sich ein Stickstoffverbrauch von etwa 0.8 Liter pro Stunde. Somit reichen die 60 Liter des Vorratsbehälters für etwa 70 Stunden. Danach muß er wieder aufgefüllt werden. Der flüssige Stickstoff wird hier am Institut durch einen Verdichtungsprozeß aus der Luft hergestellt, so daß ein ununterbrochener Detektorbetrieb gewährleistet ist. Der Detektor ist auf einer Keramikplatte montiert, die mit dem Kühlfinger in mechanischem Kontakt steht. Somit ist eine Kühlung des Detektors bis hin zu $-132°C$ möglich.

5.3.1 Die Temperaturregelung

Da die Kühlleistung des Kryostaten nicht regelbar ist und stabile Temperaturen auf dem Detektor aber unerläßlich sind, wird die Temperatur mit einer Gegenheizung stabilisiert. Dazu sind auf dem Kühlfinger 4 Heizfolien angebracht. Dadurch, daß die Versorgung dieser Folien je nach Bedarf ein- und ausgeschaltet wird (Zweipunktregelung), besteht die Möglichkeit, den ankommenden Kältestrom zu drosseln. Somit wird eine auf $\pm 0.1°C$ stabilisierte Temperatur auf dem Detektor möglich. Als Temperatursensoren werden PT100 Widerstände verwendet. Es gibt zwei PT100-Sensoren, die für die Regelung verantwortlich sind. Der eine sitzt direkt neben den Heizfolien, der zweite ist direkt auf dem pn-CCD-Detektor (Detektorsensor) angebracht. Am Anfang wurde mit dem Detektorsensor die Temperatur geregelt (wie die Regelung funktioniert, wird im späteren Verlauf erklärt). Jedoch hat man festgestellt, daß aufgrund der Entfernung zwischen Detektor und Heizung der Regeleffekt nur sehr träge eingesetzt hat. Dadurch wurde die Temperatur in einem Bereich von etwa $\pm 1°C$ geregelt. Da dies die gestellten Anforderungen bei weitem nicht erfüllt, wurde ein zweiter Sensor (Regelsensor) notwendig, der neben den Heizfolien angebracht wurde. Damit wird zwar nicht mit dem Detektorsensor geregelt, die Trennung zwischen Regel- und Detektorsensor ist aber insofern nicht problematisch, als eine konstante Temperatur am Regelort eine konstante Temperatur auch am Detektor impliziert. Allerdings muß bei der Einstellung der Solltemperatur der Temperaturgradient zwischen Regel- und Detektorsensor beachtet werden. Diese Trennung zwischen Regel- und Detektorsensor bringt zusätzlich den angenehmen Effekt mit sich, daß die scharfen Ein- und Ausschaltpunkte der Zweipunktregelung geglättet werden. Ferner besteht die Möglichkeit, mit Hilfe eines Laptop die Detektortemperatur im Laufe der Messungen zu protokollieren.

Das Schaltbild der Temperaturstabilisierung ist aus Abbildung 5.3 ersichtlich. Wie funktioniert nun diese Regelung?

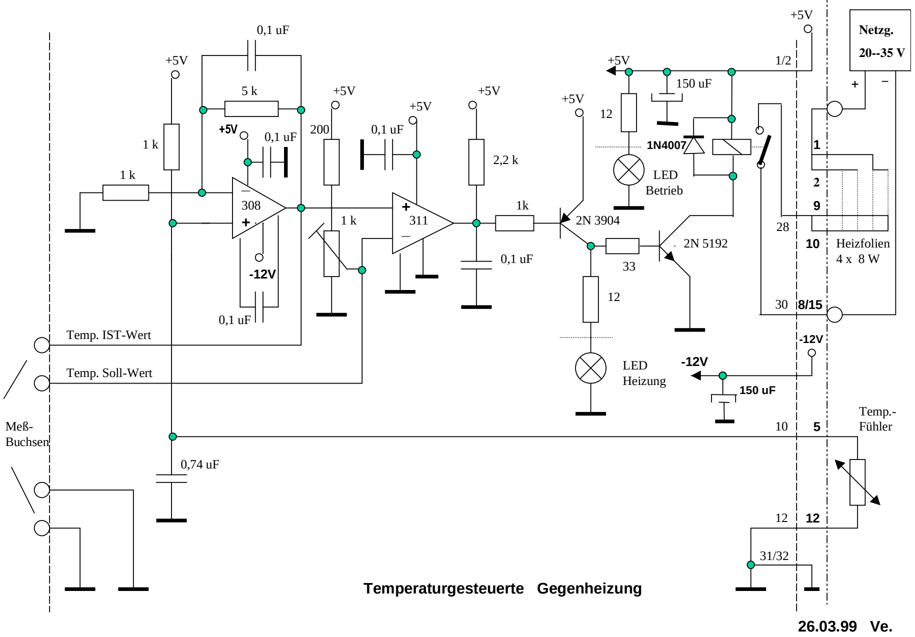


Abbildung 5.3: Regelschaltung für die Temperatur

Der Temperatursensor PT100 ist Teil eines Spannungsteilers zwischen Masse und +5V. Da der Widerstand des PT100 von der Temperatur abhängt, ändert sich auch die Eingangsspannung des Operationsverstärkers OP308. Die so verstärkte Spannung dient nun als Eingangssignal für den Komparator OP311, sie liegt am nichtinvertierenden Eingang. Am anderen Eingang dieses Komparators, am invertierenden, liegt eine vom Experimentator einzustellende Spannung. Diese Spannung entspricht der gewünschten Temperatur. Beide Spannungen, die Ist und Soll-Werte, sind an nach außen geführten Buchsen meßbar. Die gewünschte Temperatur am Detektor ist über die Spannung U_{Soll} einstellbar. Der Komparator OP311 vergleicht dann immer wieder die Soll- und Ist-Spannung. Falls der Ist-Wert kleiner als der Soll-Wert ist, so gibt er an seinem Ausgang einen Signal und steuert somit die beiden nachfolgenden Transistoren durch. Infolge dessen kann das Relais anziehen und durch den geschlossenen Kontakt die Stromversorgung für die Heizfolien einschalten. Sobald aber der Ist-Wert über den Soll-Wert steigt, werden die Transistoren vom Komparator nicht mehr angesteuert. Damit fällt das Relaiskontakt ab und durch die Heizfolien fließt kein Strom mehr. Durch das ständige Ein und Aus der Heizfolien wird schließlich eine geregelte Temperatur erreicht. An der Steuerkarte befinden sich ferner zwei Status-LEDs, die einerseits die Stromversorgung der Karte und andererseits den Strom der Heizfolien anzeigen.

Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung wurde in einem Kalibrationsvorgang während einer Abkühlphase ermittelt. Dabei wurde gleichzeitig sowohl der Widerstand des Regelsensors als auch der entprechende Spannungswert U_{Ist} protokolliert.

Berücksichtigt man einen Temperaturgradienten von 14.2 °C zwischen Regelsensor und Detektorsensor, so ergibt sich:

$$U_{Soll} = 1.566V + 12\frac{mV}{°C} \cdot (T + 107.5°C)$$

Dabei gilt :

- T ist die gewünschte Temperatur am Detektor in ° C.
- U_{Soll} ist die der Temperatur T äquivalente Sollspannung.

Damit erreicht die Regelschaltung eine Steigung von $12\frac{mV}{°C}$

5.4 Die Versorgungsspannungen

Der pn-CCD-Detektor, die Röntgenröhre und die komplette elektronische Steuereinheit verlangen eine Vielzahl von Spannungen. Diese werden mit externen Netzgeräten erzeugt, die alle in einem Rack aufgebaut sind. Die Komponenten können in drei Gruppen klassifiziert werden:

1. Die erste Gruppe gewährleistet die Versorgung der EPEA-Box. Hierbei handelt es sich um drei Spannungen, digital +5 V und analog ±5.6 V.
2. Die zweite ist die sog. Power-Box. Sie ist zuständig für die Spannungen am Detektor. Viele davon werden durch eine zusätzliche Elektronik geschaltet. Die Spannungen für den Detektor werden über ein Flexlead in die Vakuumkammer geführt.
3. Die dritte Gruppe umfaßt die sonstigen Spannungsquellen. Darunter befinden sich zwei Netztgeräte für die Röntgenröhre und eines für die Gegenheizung der Temperaturregelung.

5.5 Das Sicherheitssystem

Der Betrieb einer Röntgenröhre birgt prinzipbedingt große Gefahren in sich. Es muß sichergestellt sein, daß beim Entfernen der Schutzverkleidung keine Hochspannung mehr anliegt. Aus diesem Grund befindet sich im Inneren ein Mikroschalter. Wird nun die Schutzverkleidung entfernt, so schaltet der Mikroschalter sofort die Hochspannungsquelle ab.

Ferner muß bei einem Vakuumeinbruch das Durchglühen der Kathode verhindert werden. Aus diesem Grund ist sowohl die Heizspannungsversorgung der

Emissionskathode als auch die Hochspannungsquelle mit dem Manometer gekoppelt. Steigt nun der Druck über $1,0 \cdot 10^{-5}$ mbar, so werden die beiden Netzgeräte der Röntgenröhre abgeschaltet.

Notwendig ist auch eine Absicherung der Pumpeinheit gegen Stromausfall. Bei einem Stromausfall schließt sich automatisch das Ventil zur Vorpumpe. Bei der Wiederherstellung der Stromversorgung würde die Pumpe zuerst dieses Ventil öffnen, die Kammer mit Luft belüften und anschließend mit dem Auspumpen beginnen. Dies hätte zur Folge, daß die Feuchtigkeit aus der Luft die Innenwände der Kammer und den Detektor zu sehr kontaminiert. Wird dabei der Detektor auch noch gekühlt, so würde er vereisen. Um ein automatisches Wiedereinschalten der Pumpe zu verhindern wird sie über eine Einschaltsicherung versorgt, so daß ein Einschalten ausschließlich manuell möglich ist. Dadurch kann vor einem erneuten Einschalten der Vakuumpumpe die Kammer mit reinem und trockenem Stickstoff belüftet werden und dann mit dem Wiederauspumpen angefangen werden.

5.6 Die Datenwege

Der Detektor wird von einem NT-Rechner mit entsprechender Software kommandiert. Die Kommandos kommen über die PEP-Station (eine Echtzeitdatenverarbeitungseinheit der Firma „PEP Modular Computers") zum EPCE. Die PEP-Station spielt somit im Versuchsaufbau die Rolle der EPDH, bzw. der Bodenstation. In der EPCE werden die Telekommandos entsprechend aufbereitet und über das LBR zur EPEA geleitet. Die Detektorsignale werden von der EPEA verarbeitet und dann über das HBR in die PEP-Station übertragen. Dies geschieht über ein serielles Interface (SIF), das in die PEP-Station eingebaut ist. Die Software der Pep-Station holt sich dann die Daten über das SIF und schreibt sie in einen speziellen Speicherbereich. Dieser Bereich heißt Shared-Memory (SM). Zugelassene Rechner können auf diesen Speicherbereich zugreifen und die dort befindlichen Daten in Echtzeit auslesen und online darstellen. Im Aufbau der Sternwarte ist dies z.B. die HP-Workstation „aitew2". Ferner bietet der NT-Rechner die Möglichkeit, alle Daten zu loggen. Damit wird eine spätere Offline-Auswertung ebenfalls mit der aitew2 ermöglicht. In folgender Abbildung 5.4 wird obiger Sachverhalt nochmals graphisch dargestellt.

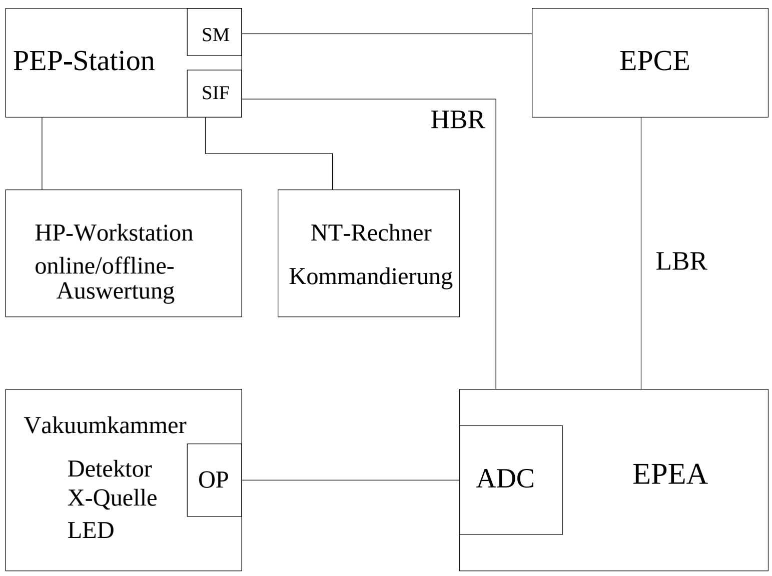


Abbildung 5.4: Datenwege

Kapitel 6

Messungen an der Testanlage

Die erste Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit war die Inbetriebnahme der neuen Vakuumtestanlage im Reinraum der Sternwarte. Nach einigen Erweiterungen und Verbesserungen konnte dies auch erreicht werden, so daß ein Funktionieren der Anlage gewährleistet war. Für die ersten Versuche wurde die Magnesium-

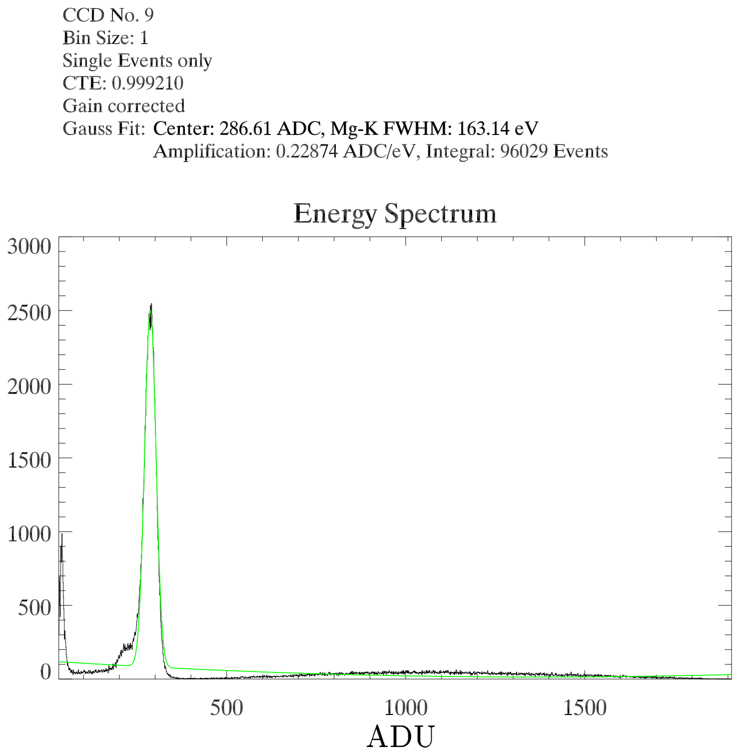


Abbildung 6.1: Spektrum der Mg-K_α-Linie

Anode ausgewählt. Erste Messungen lieferten noch kein Röntgenspektrum. Dies lag aber, wie es sich dann herausgestellt hat, an der zu stark verschmutzten Glühkathode der Röntgenröhre. Ein Ausheizen mit etwa 1.2 A über einen Zeitraum von mehreren Stunden schaffte Abhilfe. In Abbildung 6.1 ist dieses erste Spektrum der Mg-K_α-Linie dargestellt.

Das wissenschaftliche **Ziel der Messungen** dieser Arbeit war die Untersuchung der Einwirkungen von optischem Licht auf das Röntgenspektrum. Speziell sollte untersucht werden, wie sich die CTE verändert, wenn der Detektor gleichzeitig mit optischem Licht und Röntgenlicht bestrahlt wird. Überlegungen im Vorfeld haben ergeben, daß diese simultane Bestrahlung zu einer CTE-Verbesserung führen sollte. Denn werden in den bestrahlten Pixel aufgrund der optischen Anregung zusätzliche Elektronen erzeugt, so führen diese Ladungen zu einer Absättigung der Störstellen in Schieberichtung. Dadurch können die von den Röntgenphotonen generierten Ladungen besser durchgeschoben werden und erleiden somit weniger Verluste.

Hierzu vielleich eine anschauliche Analogie: es gebe eine Straße mit Schlaglöchern. Startet nun eine Walze am Anfang der Straße und schiebt dabei Sand vor sich hin, so füllt dieser Sand die Schlaglöcher auf. Die Straße wird also gewissermaßen geebnet. Übertragen wir diese Analogie aufs CCD, so werden aus obiger „Straße” die Spalten wo geschoben wird. Aus den Schlaglöchern werden die Störstellen des CCD und der Sand ist die Menge der Elektronen, die durch das optische Licht generiert wurde.

Eine zuverlässige Ermittlung der CTE ist allerdings nur dann möglich, wenn auf dem Detektor nur ein kleiner Ausschnitt von wenigen Pixeln bestrahlt wird. Nur dann ist sichergestellt, daß die Pixel in Schieberichtung keine weiteren Ladungen enthalten. Da die CTE auch von der Temperatur abhängt, sollten die kompletten Meßreihen bei mehreren Temperaturen gemacht werden.

6.1 Vorbereitung der geplanten Messungen

Um den Detektor in einem definierten Bereich zu bestrahlen, wurde vor dem pn-CCD-Detektor eine genügend große Blende eingebaut um den ganzen Detektor abdecken zu können. In dieser Blende befinden sich mehrere Bohrungen durch die der Detektor bestrahlt werden kann. Die Bohrung die letztendlich für die Messungen verwendet wurde hatte einen Durchmesser von 0.8 mm und deckt damit einen Ausschnitt von etwa 5×5 Pixel ab. Die Blende ist an einer Mikrometer-Schraube befestigt die über eine Vakuumdurchführung von außen einstellbar ist. Die Positionierung der Löcher in der Blende ist somit auf ein Pixel genau möglich.

Das optische Licht wird mit Hilfe von zusätzlich eingebauten LEDs erzeugt. Diese befinden sich kreisförmig angeordnet in einer Halterung um die optische Achse des Strahlenganges. Es sind insgesamt 12 LEDs vorhanden die in jeweils vier Farbgruppen einzuordnen sind: gelb, grün, rot und infrarot. Pro Farbe gibt es zusätzlich eine Unterteilung in Abhängigkeit der effektiven Fläche der LEDs. Pro LED stehen somit 3 Öffnungen zur Verfügung, jeweils mit einem Durchmesser von 0.2, 0.5 und 0.8 mm. Außerdem ist die Spannungsversorgung der LEDs einstellbar, so daß die Beleuchtungsstärke steuerbar ist. Damit wird eine Untersuchung in Abhängigkeit der Lichtmenge ermöglicht.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie des verwendeten LED (gelbes LED mit der Blende 0.2 mm) kann man Abbildung 6.2 entnehmen.

Die Blendenöffnung wurde nun auf die Zeilen 130 bis 135 in den Spalten 28 bis 32 positioniert. Bei Bestrahlung mit Röntgenlicht wird dann nur dieser Ausschnitt beleuchtet. Da eine Positionierung der LEDs auf der optischen Achse nicht möglich war, befinden sich die LEDs etwa 3 cm seitlich von der optischen Achse. Der Abstand bis zum Detektor beträgt etwa 50 cm, so daß der Detektor

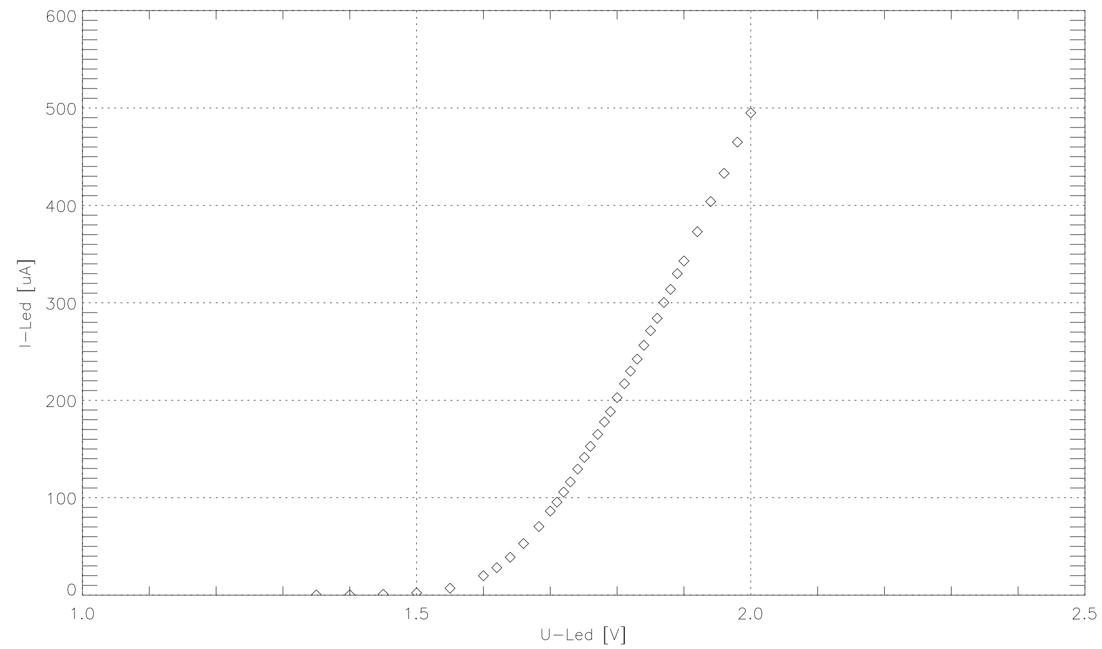


Abbildung 6.2: Diodenkennlinie des verwendeten LED

aufgrund seiner guten Ortsauflösung beide Lichtquellen auflösen kann. Damit wird das Licht der LEDs auf einen anderen Pixelbereich abgebildet. Dies verdeutlicht auch Abbildung 6.3. [1]

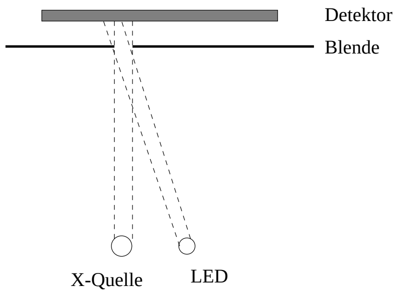


Abbildung 6.3: Abbildung der Lichtquellen

Wichtig ist jedoch in Hinsicht auf die geplanten Untersuchungen, daß das LED-Licht so gut wie nur möglich in dieselben Spalten fällt wie die Röntgenphotonen. Ein Durchprobieren aller LEDs hat ergeben, daß diese Bedingung die gelbe LED Nummer 1 mit dem Beleuchtungsdurchmesser 0.2 mm am besten erfüllt. Zwar trifft das LED-Licht nicht dieselben Pixel, befindet sich jedoch genau daneben in denselben Spalten in Schieberichtung. Damit werden die gestellten Bedingungen erfüllt und beim Schieben stellt das optische Licht der LED gewissermaßen eine Bugwelle dar, die auf ihrer Spur die Störstellen des pn-CCD-Detektors absättigen kann. Wie die Abbildung der beiden Quellen auf den Detektor aussieht, wird aus Abbildung 6.4 ersichtlich. Darin stellt der rote Bereich die Pixel mit

[1]Nicht maßstabsgetreu, soll nur die Problematik verdeutlichen.

dem Anteil des optischen Lichtes dar. Die grüne Verteilung enthält die von den Röntgenphotonen beleuchteten Pixel.

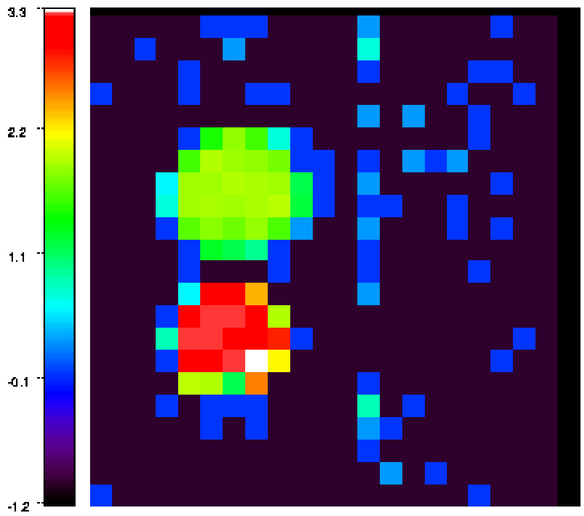


Abbildung 6.4: Detektorbild der beiden Lichtquellen. Rot gekennzeichnet ist der LED-Peak, grün der Röntgenpeak. Schieberichtung ist nach unten.

An dieser Stelle vielleicht noch zwei Begriffserläuterungen die im weiteren öfters verwendet werden:

1. Der LED-Peak ist der Pixelbereich auf den das LED-Licht abgebildet wird.
2. Der Röntgen-Peak ist der Bereich auf den das Röntgen-Licht abgebildet wird.

6.2 Messungen

Wie schon am Anfang dieses Kapitels dargestellt wurde, war das Ziel der Messungen die Untersuchung der CTE-Veränderung aufgrund der Belichtung mit optischem Licht. Dazu mußte zunächst eine Möglichkeit gefunden werden, die vom LED im Detektor erzeugte Lichtmenge zu quantifizieren. Es gibt zwei Möglichkeiten:

1. Die Offsettabelle (Offsetmap)
2. Die Rauschkarte (Noisemap)

Es wurde die Offsetmap jeweils mit LED- und ohne LED-Beleuchtung gerechnet. Durch bilden der Differenz

Offset mit Licht minus Offset ohne Licht bleibt nur der Anteil übrig den das LED-Licht in dem ausgewählten Pixelbereich beiträgt.

Die Auswertung der Zeilenverteilung in den Spalten 28 bis 31 wird in Abbildung 6.5 gezeigt. Auf der x-Achse ist dabei die Zeilennummer des Detektors und auf der y-Achse die Offset-Differenz aufgetragen. Gekennzeichnet sind darin mit waagerechten Linien der mittlere Untergrund und das Maximum bzw. der Mittelwert im untersuchten Bereich. Auffallend ist, daß der mittlere Untergrund einen Wert von etwa 40 ADUs aufweist. Dies liegt daran, daß die verwendeten Programme für die Darstellung der Differenzen keine negativen Werte verarbeiten können. Aus diesem Grund wurde dem gesamten Differenzspektrum ein konstanter Offset von 40 ADUs addiert. Dies ist jedoch für die weitere Auswertung irrelevant, da sowieso nur die Relativwerte zwischen Peak und Untergrung wichtig sind.

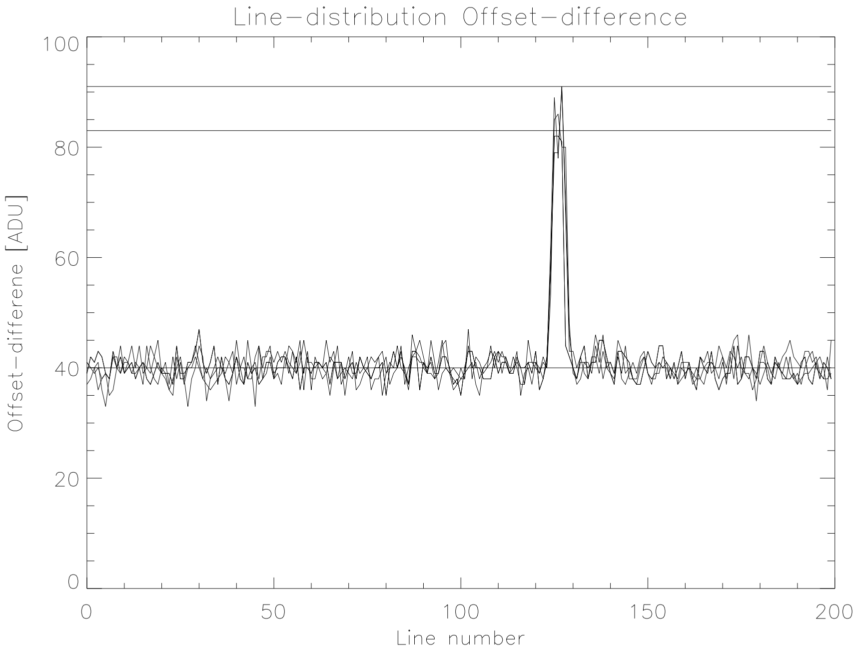


Abbildung 6.5: Zeilenverteilung der Offset-Differenzen über die Spalten 28 bis 31

Da die Spannung an der LED-Diode einstellbar ausgelegt ist, können nun Offset-Differenzen für mehrere Beleuchtungsstärken gebildet werden. Die variable Spannungsversorgung erlaubt eine Einstellung von minimal 1.250 Volt bis knapp über 2.0 Volt.

Nun mußten Spektren bei den verschiedenen Lichtmengen aufgenommen werden, da sich eine CTE-Veränderung in in der Verschiebung der Peaklage der beobachteten Linie bemerkbar macht. Die Korrelation der Peaklagen mit der Menge des LED-Lichts erlaubt somit eine Aussage über die CTE-Veränderung.

Kapitel 7

Auswertung der Messungen

Um Differenzen und Spektren wie in Kapitel 6.2 angedeutet berechnen und darstellen zu können, wurden spezielle Routinen in der Programmiersprache "IDL" erstellt. Diese wurden größtenteils von Markus Kuster entwickelt und erlauben aufgrund des modularen Aufbaus eine recht einfache Einbindung in die eigenen IDL-Programme.

7.1 IDL-Programme

Folgende Programme wurden für die speziellen Messungen dieser Diplomarbeit erstellt:

1. jpshowoffsetdiff
2. jpoffsetdiff
3. jpspectrum
4. jppeakpos
5. jpcte

Was tun diese Programme ?

jpshowoffsetdiff liest zwei Offsetmaps ein, bildet die Differenz und rechnet in einem wählbaren Ausschnitt den Mittelwert aus. Der wählbare Auschnitt ist dann nichts anderes als die Abbildung des LED-Lichtes durch die Blende, also stellt dort die Differenz der beiden Offsetmaps ein Maß für die Lichtmenge dar.

jpoffsetdiff führt *jpshowoffsetdiff* für eine ganze Reihe von Offsetmaps aus, genauer gesagt für Offsetmaps die mit unterschiedlicher Beleuchtung aufgenommen wurden. Außerdem speichert es die berechneten Werte ab und stellt sie somit für die anderen Programme zur Verfügung.

jpspectrum liest ein Spektrum ein, erstellt einen Gaussfit dazu und liefert einige statistische Angaben über das Spektrum und den Fit. *jpspectrum* baut auf eine externe Prozedur *mkspectrum* auf, bietet jedoch zusätzlich die Möglichkeit, das Spektrum in einem frei bestimmbarem Pixelbereich zu berechnen.

jppeakpos berechnet aufbauend auf *jpspectrum* die Peaklagen für die unterschiedlichen Beleuchtungen und erstellt einen Plot der Peaklagen in Abhängigkeit von der Lichtmenge. Aus diesem Plot wird dann eine CTE-Veränderung ersichtlich.

jpcte kann die vorher berechneten und gespeicherten Peaklagen in Abhängigkeit der Lichtmenge (Offset-Differenz) auswerten und daraus die CTE bestimmen.

Der Vollsändigkeit halber sind die Prozedurdefinitionen im Anhang aufgeführt.

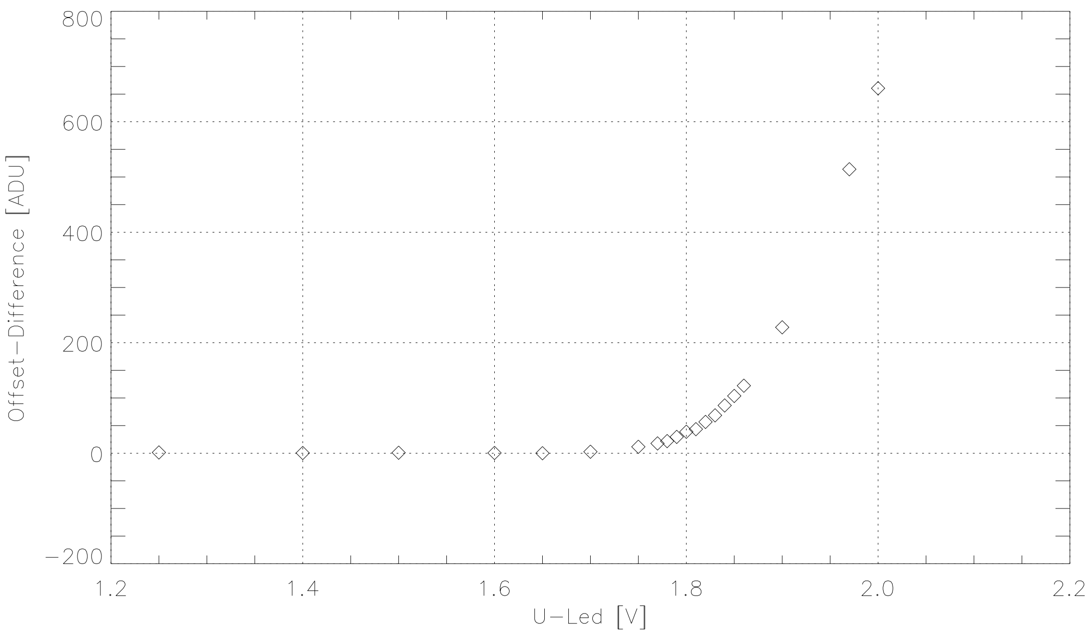
7.2 Auswertung der Offset-Messungen

Um die Lichtmenge im LED-Peak in Abhängigkeit der LED-Spannung bestimmen zu können, wurden eine Reihe von Spannungen eingestellt und die Offsettabellen berechnet. Danach wurden jeweils die Tabellen ohne LED-Beleuchtung abgezogen. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 7.1 ersichtlich. Ferner wurden bei den eingestellten Temperaturen einige der Offset-Differenzen zweimal ermittelt.

Tabelle 7.1: Lichtmengen in der Offsetkarte

	Lichtmenge [ADU]			
U-Led [V]	-108 °C	-108 °C	-80 °C	-80 °C
1.250	1.42	0.10	0.77	
1.400	0.41		-0.54	
1.500	0.97		-0.57	
1.600	0.55		-0.69	
1.650	0.04		-0.14	
1.700	2.77	2.91	1.65	2.34
1.750	11.66		11.87	10.71
1.770	17.81		19.28	18.28
1.780	21.99		25.62	23.59
1.790	29.55		34.33	30.92
1.800	38.85	37.55	41.00	40.15
1.810	43.58		50.22	50.67
1.820	56.69		63.54	62.00
1.830	68.61		78.44	77.26
1.840	86.50		95.33	92.71
1.850	103.77	102.94	111.39	109.52
1.860	122.30		132.50	130.74
1.900	227.96	220.00	243.24	
1.970	514.08		545.63	
2.000	660.65	649.00	700.74	

Auffallend beim ersten Blick auf die Tabelle sind die vier negativen Werte bei -80°C. Diese Werte sind natürlich nicht physikalisch (negative Lichtmenge) und lassen sich durch statistische Schwankungen des Untergrundes erklären (siehe



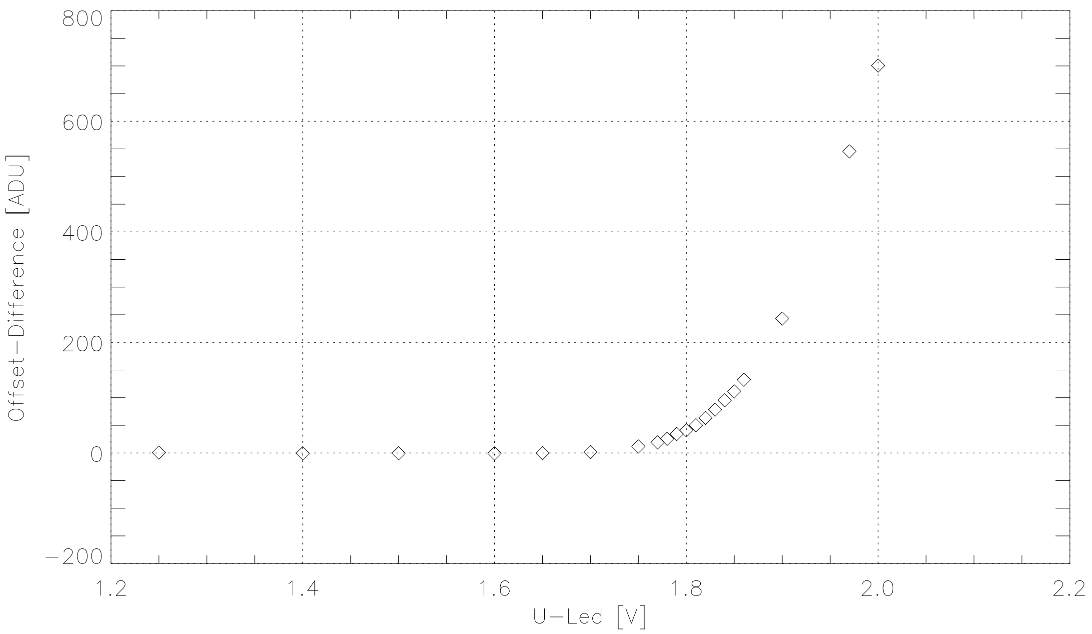


Abbildung 7.1: Die Lichtmenge in Abhängigkeit der LED-Spannung, oben bei -108°C und unten bei -80°C

Abb. 6.5). Durch die Bildung der Differenzen zweier Offsetmaps kann es zu einem negativen Ergebnis kommen. Ferner stellt man für die niedrigen LED-Spannungen bis 1.650 Volt keine eindeutige Tendenz in der Lichtmenge fest. Dies hat folgenden Grund: die Standardabweichung des Untergrundes bewegt sich bei allen Spannungswerten in einem Bereich von etwa 2.0 bis 2.5 ADUs und dadurch, daß die LED gerade bei diesen Spannungen anfängt Licht zu emittieren (siehe

Kennlinie in Abb. 6.2), ist die statistische Schwankung des Untergrundes viel größer als die detektierte Lichtmenge. Ein weiterer Unterschied der Werte bei den beiden Temperaturen besteht darin, daß die detektierte Lichtmenge bei -80°C etwa 7 bis 15 % höher ausfällt als bei -108°C. Dieser Unterschied hat seinen Ursprung wahrscheinlich in der höheren Temperatur und bedarf in der Zukunft einer näheren Untersuchung.

Die graphische Darstellung der Tabelle 7.1 ist aus den Abbildungen 7.1 ersichtlich. Darin erkennt man wieder den Verlauf der LED-Kennlinie von Abb. 6.2.

7.3 Auswertung der Noise-Messungen

Bei der Temperatur -108 °C wurden neben den Offsetkarten auch die Rauschkarten aufgenommen. Dies erfolgte nach demselben Prinzip wie bei den Offsettabellen. Ausgewertet wurden die Rauschdifferenzen bis etwa 25 ADUs. Diese Grenze ergibt sich aus der Tatsache, daß höhere Rauschwerte, die von der beobachteten Quelle durch deren optische Komponenten verursacht werden, das beobachtete Spektrum zu sehr verbreitern.

Die Meßergebnisse der Rauschdifferenzen sind aus Tabelle 7.2 ersichtlich.

Tabelle 7.2: Lichtmengen in der Rauschkarte

U-Led [V]	Noise-Differenz [ADU]
off	0
1.250	0.12
1.400	-0.23
1.500	0.12
1.600	0.07
1.650	0.13
1.700	0.50
1.720	1.60
1.740	4.40
1.750	1.60
1.760	11.12
1.770	15.28
1.780	19.57

In Tabelle 7.2 ist die Noise-Differenz ohne Beleuchtung per Definition null und die leichten Schwankungen bis 1.650 V lassen sich statistisch erklären. Eine deutliche Differenz tritt erst ab 1.700 V auf. Eine Darstellung der Lichtmenge aus Tabelle 7.1 gegen die berechneten Noise-Werte aus Tabelle 7.2 ist in Abbildung 7.2 gegeben.

Die Korrelation zwischen den Lichtmengen und Rauschwerten wird später in Kapitel 7.7 ausführlich diskutiert.

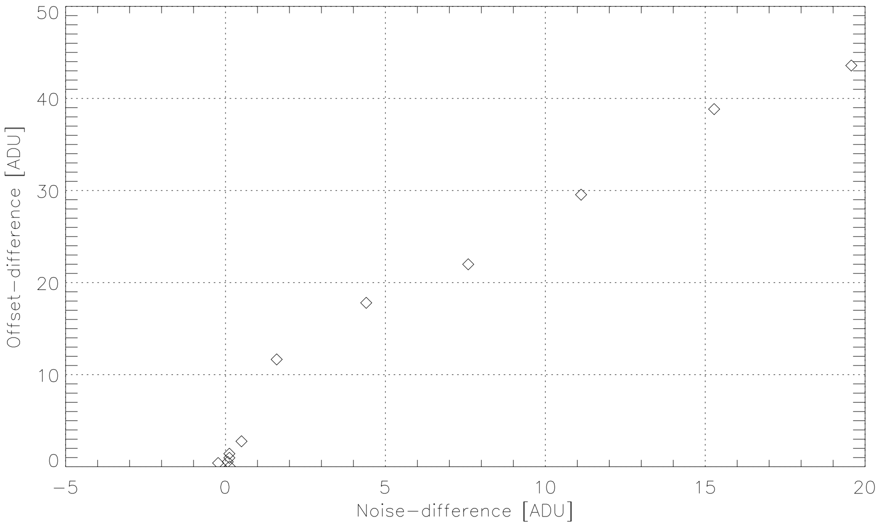


Abbildung 7.2: Lichtmenge als Funktion der Rauschdifferenzen

7.4 Auswertung der Spektren

Wie schon im Kapitel 4.4 dargestellt wurde, macht sich eine CTE-Veränderung an der Peaklage der beobachteten Linie bemerkbar. Die Spektren der Al-K_α- und Ti-K_α- Linien wurden deshalb bei denselben Beleuchtungsstärken wie die Offsetmaps aufgenommen. Die Auswertung erfolgte mit den schon besprochenen idl-Programmen. Dabei wurden die aufgenommenen Spektren nur Gain- jedoch nicht CTE- korrigiert. Die aus einer Flatfield-Belichtung ermittelte CTE Korrektur würde in unserem Fall zu einer Überkorrektur der Peaklage führen, da sie das zusätzliche Licht von der LED nicht berücksichtigt. Die Gain korrigierten Messpunkte sind aus Tabelle 7.3 ersichtlich.

Tabelle 7.3: Peaklagen bei verschiedenen Temperaturen

	Al-K$_\alpha$ [ADU]			Ti-K$_\alpha$ [ADU]
U-Led [V]	-108 °C	-80 °C	-80 °C	-108 °C
1.250	296.706	287.236		914.650
1.400	296.978	287.437		
1.500	297.704	287.644		
1.600	297.521	287.615		
1.650	298.239	287.363		
1.700	298.245	287.333	287.367	915.561
1.750	299.107	289.158	287.430	
1.770	300.237	289.849	288.179	
1.780	301.216	288.983	288.612	
1.790	301.855	290.027	288.466	
1.800	302.040	289.196	289.985	921.233
1.810	302.159	290.596	289.924	
1.820	302.590	289.001	289.961	
1.830	303.678	290.844	289.421	
1.840	303.949	290.559	290.383	
1.850	304.942	290.588	290.959	925.979
1.860	305.963	291.531	290.859	
1.900	308.204	293.039		931.841
1.970	309.604	295.193		
2.000	310.897	295.847		943.227

Aus den Abbildungen 7.3 und 7.4 ist das Al-K$_\alpha$- und Ti-K$_\alpha$-Spektrum jeweils ohne Licht bei -108°C ersichtlich. Es wurden jeweils Gaussfits an die untersuchten Linien gelegt und über den Bereich des Gaussfits integriert (240-370 ADUs bei Al, 800-1100 ADUs bei Ti). Bei allen Aufnahmen der Spektren wurde darauf geachtet, daß im Integral dieselbe Statistik von etwa 2700 bis 2900 Events vorlag.

Eine graphische Darstellung der Tabelle 7.3 würde eine ähnliche Kurve wie die LED-Kennlinie ergeben. Da die Peaklagenverschiebung in Abhängigkeit der Lichtmenge bestimmt werden sollte, ist eine Darstellung Peaklage gegen Lichtmenge vorteilhafter. Die Kombination der Lichtmengen aus Tabelle 7.1 mit den Peaklagen aus Tabelle 7.3 ergibt die gewünschten Zusammenhänge, die nun im weiteren diskutiert werden.

Aufgrund der endlichen Meßzeit gibt es in den ermittelten Peaklagen statistische Schwankungen. Um etwas über die Zuverlässigkeit der gemessenen Peaklagen aussagen zu können, wurden bei -80°C eine Reihe von Spektren mit der Energie der Al-K$_\alpha$ Linie ohne LED-Beleuchtung aufgenommen. Dabei wurde darauf geachtet, daß im Integral des Gaussfits an den Peak dieselbe Statistik, d.h. dieselbe Anzahl von Events vorkommt. Aus den Messungen wurde eine mittlere Peaklage und die Standardabweichung berechnet. Die berechnete Standardabweichung wurde zu $\pm$ 0.53 ADU ermittelt und bei allen Al-K$_\alpha$-Peaklagen als Fehlerbalken verwendet. Ähnliches gilt für Ti-K$_\alpha$-Linie, dort beträgt die Standardabweichung 1.21 ADUs.

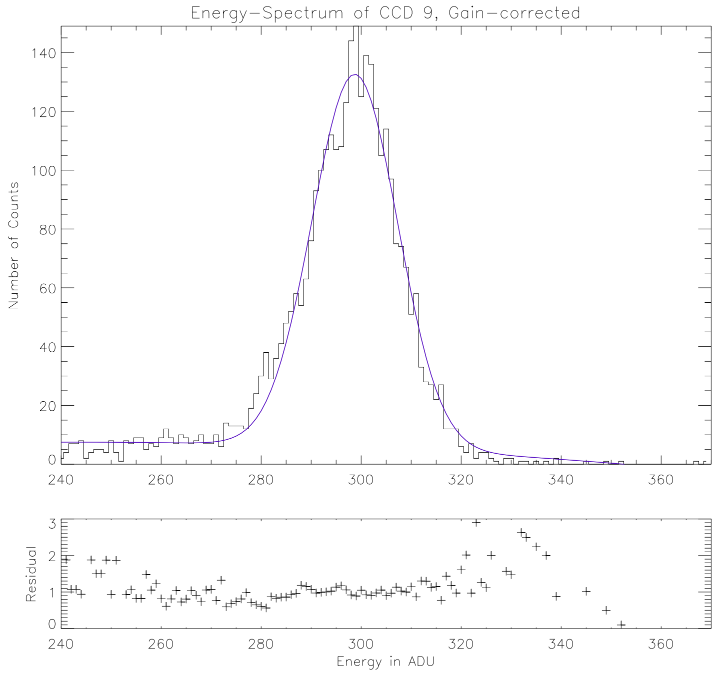


Abbildung 7.3: Spektrum der Al-K_α-Linie

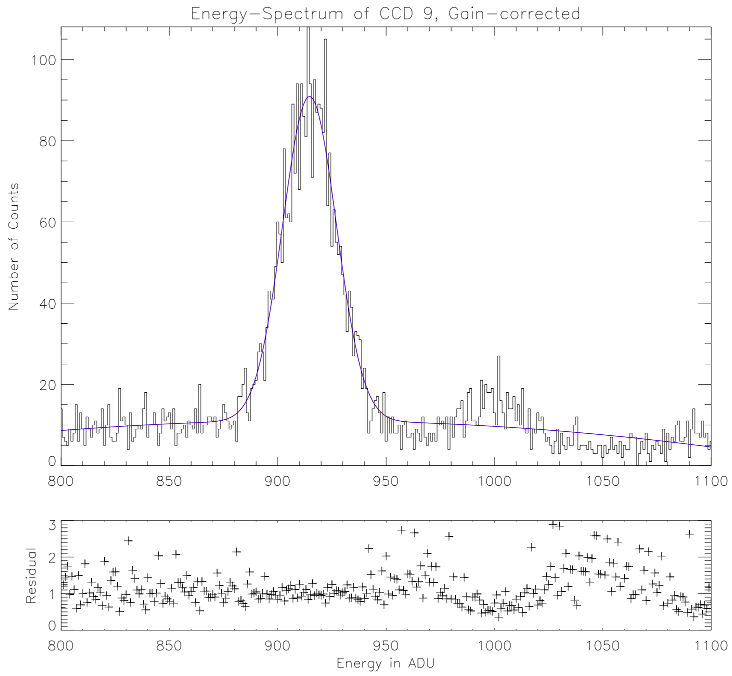


Abbildung 7.4: Spektrum der Ti-K_α- und K_β-Linie

7.4.1 Ergebnisse bei -108°C mit der Al-K_α-Linie

Die gemessenen Peaklagen bei -108°C sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

Was wird aus dieser Abbildung ersichtlich? Als erstes stellen wir eine mit

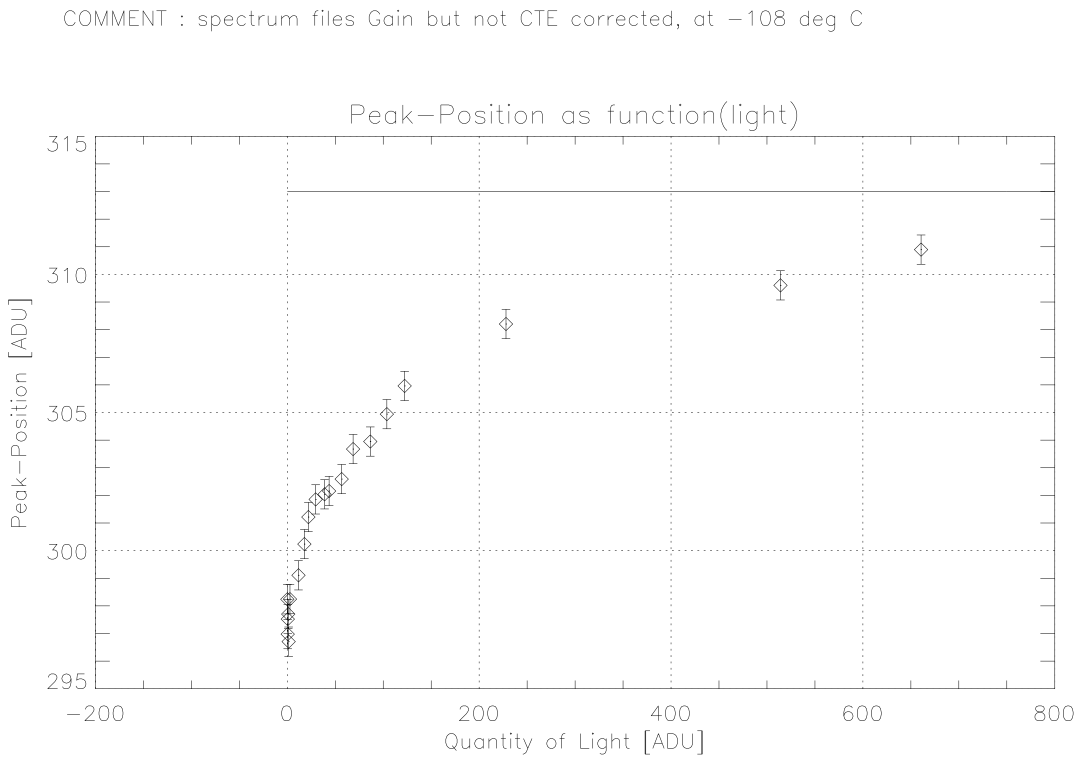


Abbildung 7.5: Die Peakpositionen der Al-K_α -Linie bei -108°C

der Beleuchtung zunehmende Peaklage fest. Dies bestätigt die Vermutung, daß optisches Licht die CTE des Detektors verbessert. Zusätzlich ist bei 312.75 ADUs eine Asymptote eingezeichnet. Diese Asymptote entspricht der Peaklage die sich aus der Messung direkt am CAMEX , d.h. in den Zeilen 0 bis 4 ergibt. In diesen Zeilen treten praktisch keine Verluste durch das Schieben auf, d.h. die Peaklage in diesen Zeilen entspricht einer Messung mit der CTE gleich 1. Gewissermaßen kann man auch von einer „idealen Peaklage" sprechen.

Die Umrechnung der Peaklagen in CTE mit der idl-Routine *jpcte* geschieht dann wie folgt. Die Definition der CTE

$$E_{gelesen} = E_{generiert} \cdot (CTE)^{Zeile}$$

läßt sich umformen in

$$CTE = \sqrt[Zeile]{\frac{E_{gelesen}}{E_{generiert}}}$$

In dieser Formel setzen wir für *Zeile* den Wert 133 ein, da die Lochblende vor dem Detektor auf die Zeilen 131 bis 134 positioniert wurde. Weiterhin setzen wir für $E_{generiert}$ die „ideale Peaklage"ein. Schließlich gilt für $E_{gelesen}$ die Peaklage aus dem beleuchteten Detektorbereich (also der Bereich zwischen den Spalten 29 bis 31 und den Zeilen 131 bis 134). Die Darstellung der so berechneten CTE-Werte ist aus Abbildung 7.6 ersichtlich. In der Abbildung erkennt man eindeutig, wie sich die CTE mit der Beleuchtung verbessert und sich asymptotisch in Richtung CTE gleich 1 bewegt.

Ein Ausschnitt mit der Lichtmenge bis 150 ADUs wird in Abbildung 7.7 gezeigt.

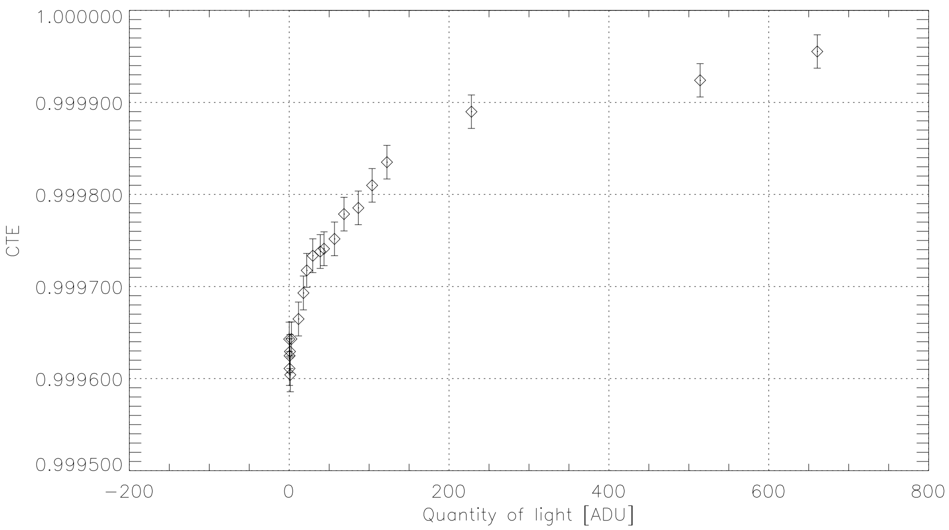


Abbildung 7.6: Der CTE-Verlauf bei -108°C mit der Al-K_α-Linie

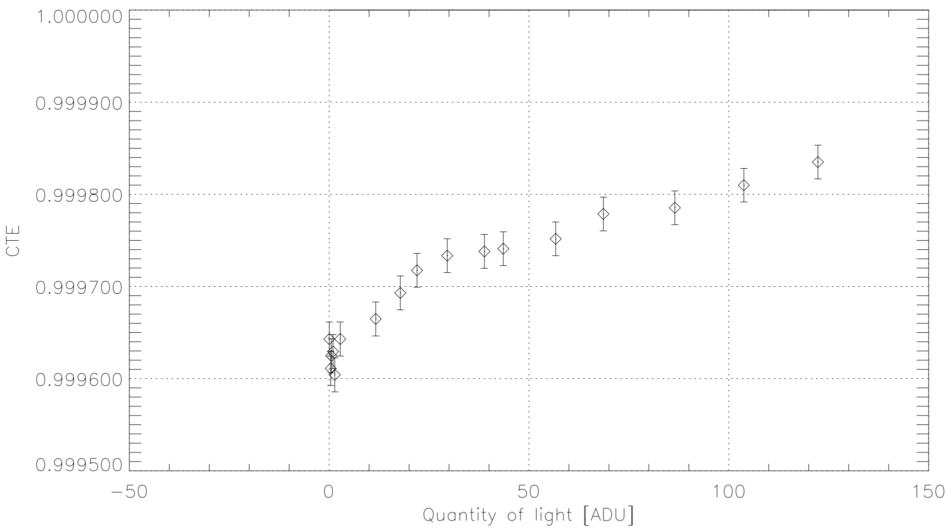


Abbildung 7.7: Ausschnitt aus Abbildung 7.6

Es fällt auf, daß bei minimaler Beleuchtung mit Licht (bis etwa 5 ADUs) eine CTE Verbesserung nicht feststellbar ist. Dieser Bereich entspricht der Leuchtschwelle der LED und läßt sich mit statistischen Schwankungen der Peaklage erklären. Eine wesentliche CTE-Veränderung erfolgt für Lichtmengen zwischen 5 und 200 ADUs, danach ist eine Abflachung der CTE-Kurve zu beobachten. Für noch mehr Licht kann die CTE nicht mehr signifikant verbessert werden, dies liegt daran, daß die meisten Störstellen schon abgesättigt wurden. Ferner ist der Schiebe-Vorgang auch mit Ladungsverlusten verbunden, dies kann nicht mit mehr Licht ausgeglichen werden.

7.4.2 Ergebnisse bei -80°C mit der Al-K_α-Linie

Obwohl auch bei dieser Temperatur ähnliches wie bei -108°C festgestellt werden kann, ergeben sich einige Unterschiede, die erklärt werden müssen. In diesem Abschnitt werden zunächst die Meßergebnisse bei -80°C dargestellt und im Kapitel 7.5 die Unterschiede diskutiert.

In Analogie zur Vorgehensweise bei -108°C wird zunächst der Zusammenhang zwischen Lichtmenge und gemessener Peaklage hergestellt. Die graphische Darstellung befindet sich in Abbildung 7.8.

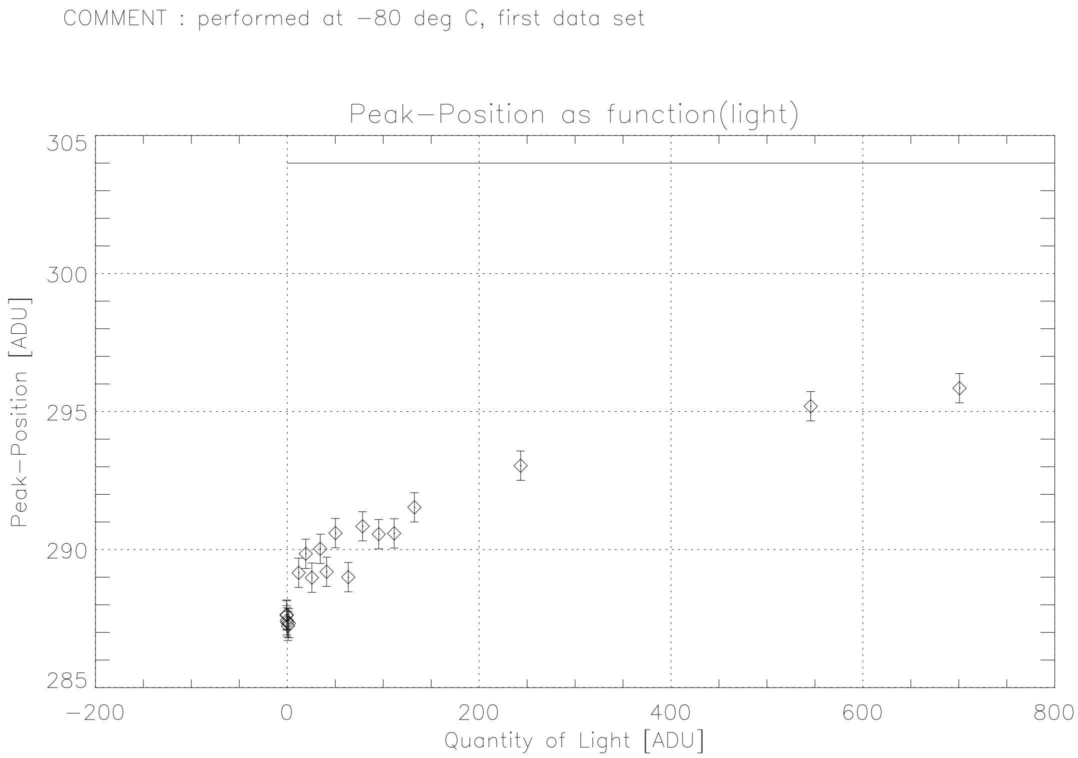


Abbildung 7.8: Die Peakpositionen bei -80°C mit der Al-K_α-Linie

Auffallend in dieser Abbildung ist, daß die Peaklagen in einem engen Bereich verteilt sind. Ferner sind einige Meßpunkte beobachtbar, die scheinbar aus der Reihe ausreißen. Bei 304.24 ADUs ist eine Asymptote eingezeichnet, sie legt die ideale Peaklage bei CTE gleich 1 fest. Um Klarheit zu schaffen, wurden einige Punkte bei dieser Temperatur neu gemessen. Die zweifach gemessenen Punkte sind aus der Tabelle 7.3 ersichtlich. Abb. 7.9 gibt beide Meßreihen wieder.

In Abbildung 7.9 ist die erste Meßreihe mit Rauten gekennzeichnet die zweite mit Rechtecken. Man stellt fest, daß bei der Mehrzahl der Meßpunkte die Abweichungen zwischen den beiden Meßreihen im Rahmen der Fehlerbalken bleiben. Somit bestätigt die zweite Meßreihe die Richtigkeit der ersten. Daß die gemessenen Peaklagen sich dicht beieinander befinden, liegt wahrscheinlich daran, daß bei dieser Temperatur (-80°C) die Verstärkung des Detektors etwa 10% niedriger ausfällt als bei -108°C. Dadurch werden die Peaklagen in vertikaler Richtung

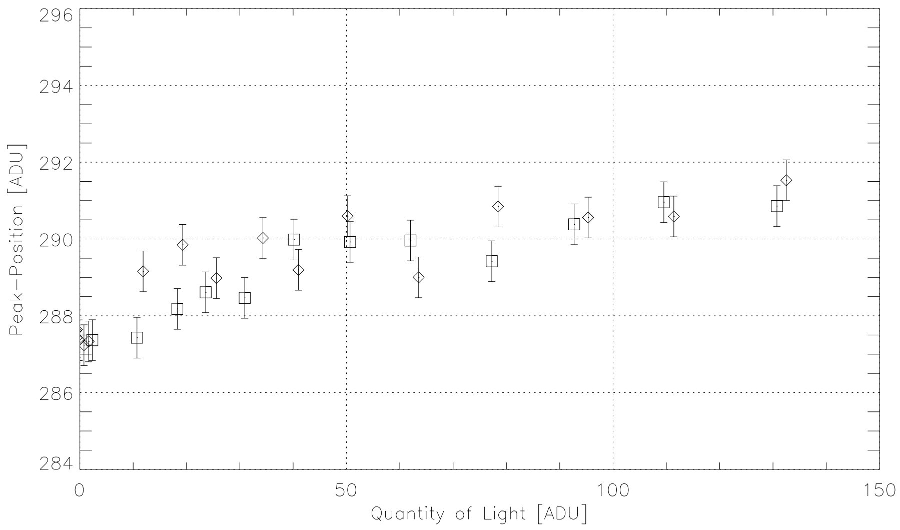


Abbildung 7.9: Die zweifach gemessenen Peaklagen. Mit Romben gekennzeichnet sind die Werte aus der ersten Meßreihe, mit Rechtecken die aus der zweiten Meßreihe.

zusammengestaucht und es bilden sich Gruppen heraus mit etwa vergleichbarer Peaklage.

Auffallend ist ferner, daß die ideale Peaklage mit der CTE gleich 1 von den Meßpunkten nicht angenähert wird. Der Grund liegt sehr wahrscheinlich daran, daß der Detektor bei der Temperatur -80°C nicht mehr 100%-ig richtig arbeiten kann. Dadurch können die in den Pixeln gesammelten Elektronen teilweise ins Substrat abfließen und fehlen somit beim Auslesen. Da die Detektorspannungen für niedrigere Temperaturen optimiert wurden, könnte eine genauere Abstimmung der Spannungen für -80°C Abhilfe schaffen.

Insgesamt bleibt jedoch die Tendenz der Peaklagenverschiebung mit zunehmender Lichtmenge unangetastet, so daß man auch in diesem Fall von einer CTE-Verbesserung ausgehen kann. Dies geht insbesondere aus Abbildung 7.10 hervor, darin ist die CTE direkt gegen die Lichtmenge aufgetragen.

Eine weitere Bestätigung für die Richtigkeit beider Meßreihen bei der Temperatur -80°C wird auch aus Abbildung 7.11 ersichtlich. In dieser Abbildung sind die zweifach gemessenen Datenpunkte übereinander geplottet. Die Datenpunkte der ersten Meßreihe sind darin mit Rauten und die der zweiten Meßreihe mit Rechtecken gekennzeichnet. Bei allen Datenpunkten der Abbildung 7.11 erkennt man lediglich statistische Abweichungen.

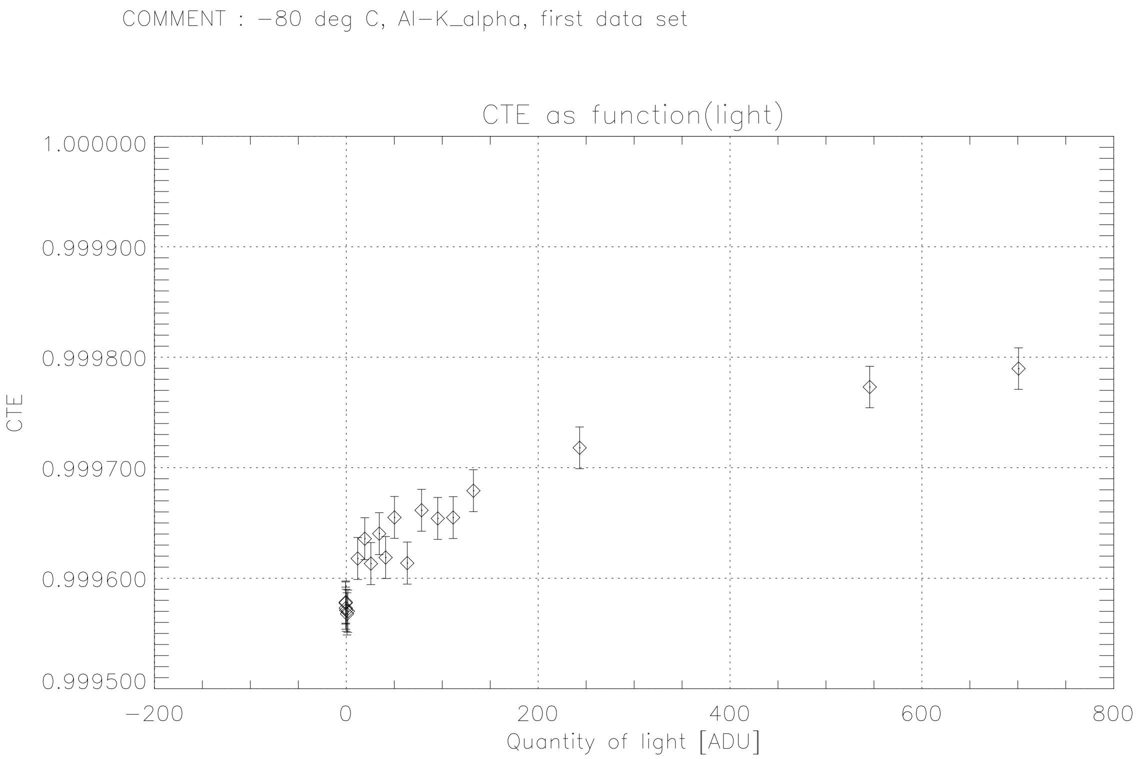


Abbildung 7.10: Die CTE in Abhängigkeit der Lichtmenge bei -80°C

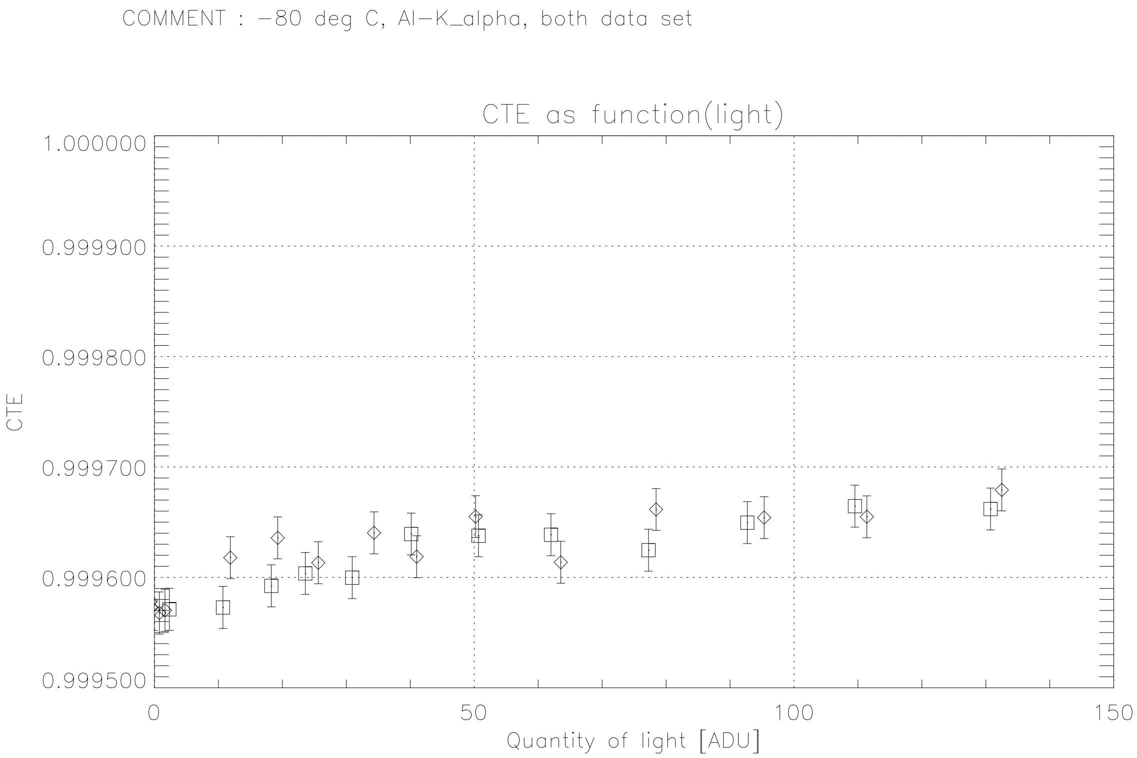


Abbildung 7.11: Die CTE-Entwicklung der beiden Meßreihen bei -80°C

7.4.3 Ergebnisse bei -108°C mit der Ti-K_α-Linie

Die gemessenen Peaklagen sind in Abbildung 7.12 dargestellt. Eingezeichnet ist auch hier bei 949.6 ADUs mit einer waagerechten Asymptote die ideale Peaklage mit der CTE=1. Mit der Lichtmenge ansteigende Peaklage bestätigt wiederum die Theorie der CTE-Verbesserung. Zum Vergleich dazu befindet sich in Abbildung 7.13 die in CTE umgerechnete Peaklage.

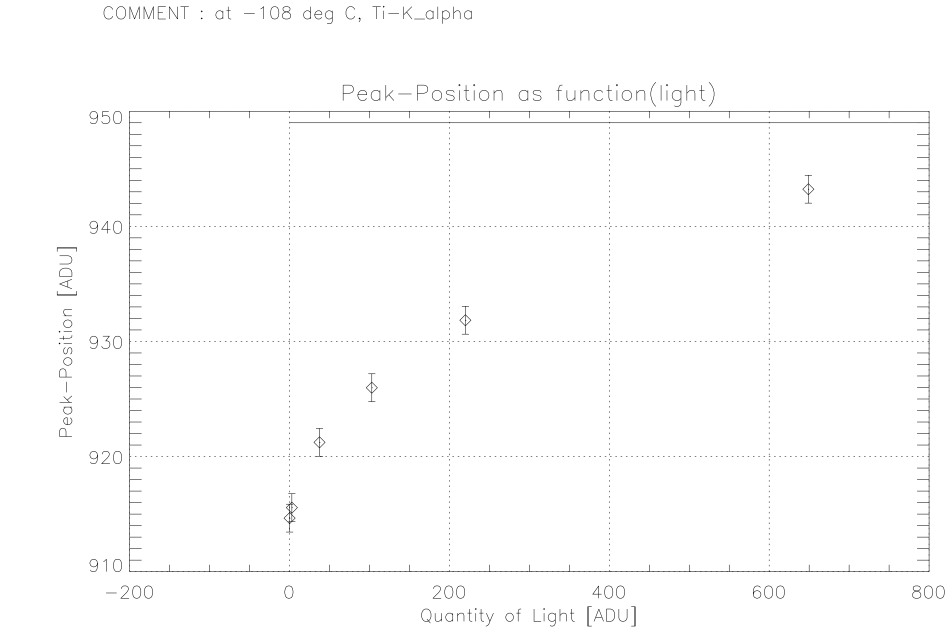


Abbildung 7.12: Die Peakpositionen der Ti-K_α -Linie bei -108°C

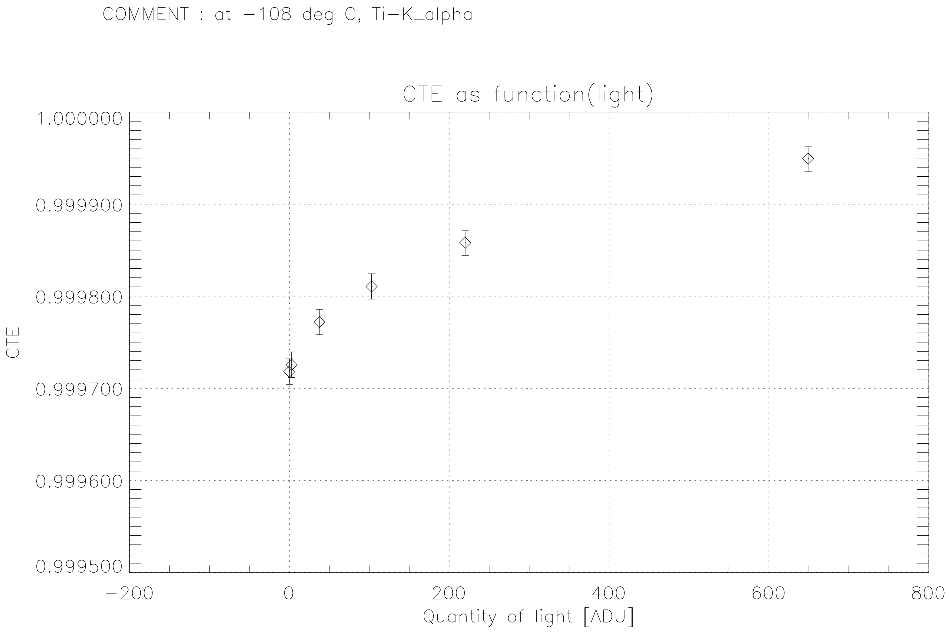


Abbildung 7.13: Die CTE in Abhängigkeit der Lichtmenge mit dem Spektrum der Ti-K_α-Linie

Eine ausführliche Diskussion und ein Vergleich der ermittelten Werten aller Messungen wird in Abschnitt 7.5 gegeben.

7.5 Diskussion der Ergebnisse

Vergleichen wir als erstes die CTE-Entwicklung des Aluminium-Spektrums bei den beiden Temperaturen. Ein direkter Vergleich ergibt sich anhand der Darstellung in Abbildung 7.14.

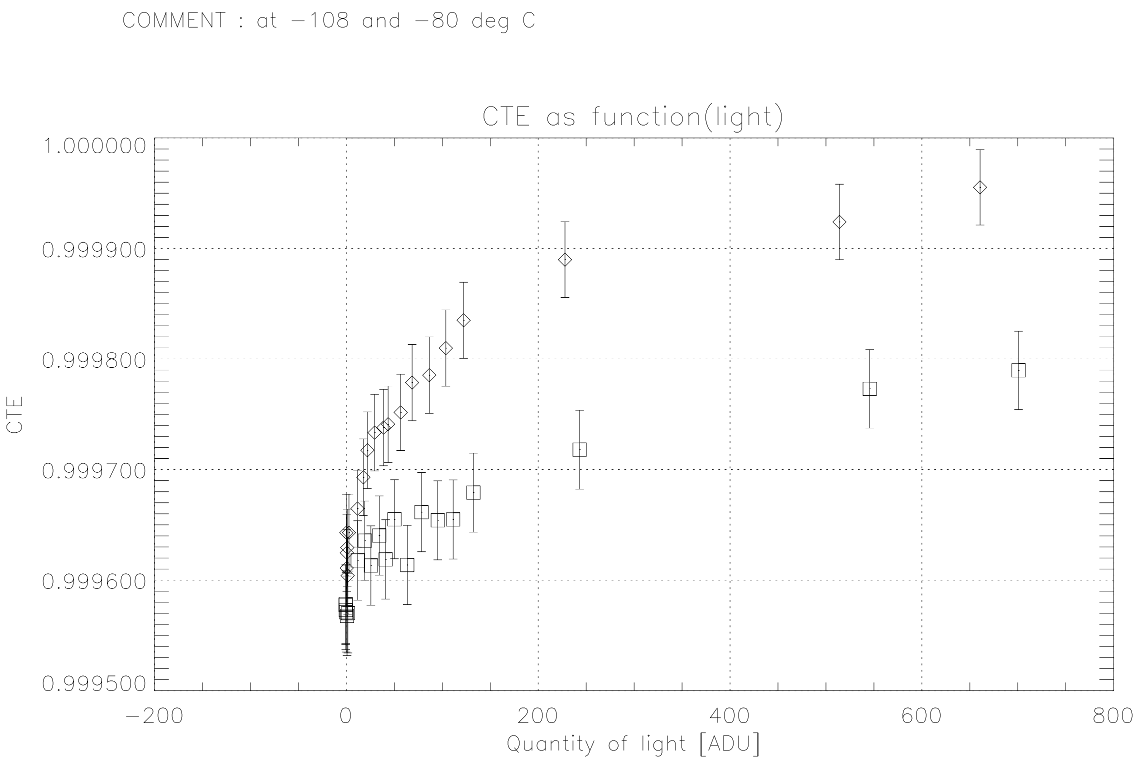


Abbildung 7.14: CTE-Entwicklung mit dem Al-K_α-Spektrum bei den Temperaturen -108°C (Romben) und -80°C (Rechtecke)

Auf den ersten Blick zeigen beide Kurven ähnliches Verhalten. Allerdings startet die bei der Temperatur -80°C aufgenommene Meßreihe bei etwas niedrigeren CTE Werten und bleibt durchgehend bei diesen niedrigeren Werten als die Meßreihe bei -108°C. Dieses Verhalten überrascht, da eigentlich erwartet wurde, daß die CTE-Werte bei -80°C höher ausfallen sollten als bei -108°C [4]. Der Grund für die erwarteten höheren Werte liegt darin, daß bei -80°C durch das höhere thermische Rauschen mehr freie Ladungsträger erzeugt werden können. Dadurch verbessert sich die CTE, da die thermisch erzeugten Ladungen zur Absättigung der Störstellen beitragen.

Die schlechteren CTE-Werte aus der Messung bei -80°C haben wahrscheinlich ihren Grund in den nicht optimierten Detektorspannungen (Rückkontaktspannung, Phi-Pulse). Stimmen zum Beispiel die Höhen der Phi-Pulse nicht, so können Ladungen ins Substrat abließen und fehlen somit beim Auslesen.

Trotzdem hat es den Anschein als wären beide Kurven identisch mit dem Unterschied, daß sie nur gegeneinander verschoben sind. Da im Bereich der Lichtmengen 200 bis 800 ADUs beide Kurven eine ähnliche Steigung aufweisen, normieren wir die bei -80°C aufgenommene Kurve auf die höhere bei -108°C. Der Gedanke für die Normierung ergibt sich aus folgender Überlegung: im Bereich ab 200 ADUs werden aufgrund der hohen optischen Lichtintensität schon so viele Ladungen erzeugt, daß dadurch alle Störstellen abgesättigt werden können. Dieser Bereich ist also frei von „Störstelleneffekten". Dazu wird gemäß

$$f = \frac{1}{3}\left(\frac{CTE_{-108}(18)}{CTE_{-80}(18)} + \frac{CTE_{-108}(19)}{CTE_{-80}(19)} + \frac{CTE_{-108}(20)}{CTE_{-80}(20)}\right)$$

ein Normierungsfaktor f mit den letzten drei aller zwanzig Werte beider Kurven bestimmt. Die Rechnung ergibt den Wert f=1.00016. Werden alle anderen Datenpunte der -80°C Meßreihe mit diesem Faktor skaliert, so sollten die CTE-Werte bei -80°C etwas höher ausfallen als bei -108°C. Anhand Abb. 7.15 bestätigt sich obige Erwartung.

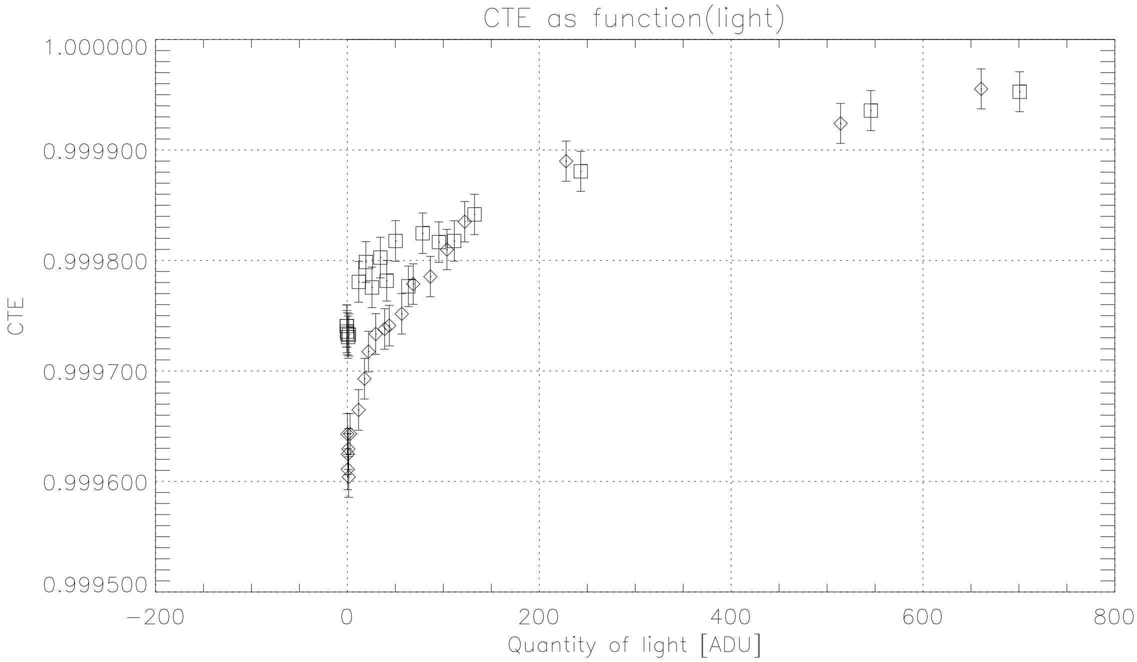


Abbildung 7.15: CTE-Entwicklung nach der Normierung. Mit Romben gekennzeichnet sind die Meßpunkte bei -108°C und mit Rechtecken diejenigen bei -80°C.

Vergleichen wir noch anhand Abbildung 7.16 die ermittelten CTEs bei derselben Temperatur (-108° C) aber mit verschiedenen Energien. Zur Anwendung kamen die schon untersuchte Al-K_α Linie mit der Energie von 1.4867 keV und die Ti-K_α Linie mit 4.5108 keV. Die mit dem Titan-Spektrum ermittelten Werte sind mit Rechtecken gekennzeichnet. Dabei wurden mit der deutlich höheren Energie von Titan sechs Spektren aufgenommen, die schon in Tabelle 7.3 aufgeführt wurden.

Folgendes stellt man fest: Aufgrund der höheren Energie von Titan werden mehr Signalladungen im Detektor erzeugt, somit liegt die CTE ohne zusätzliches optisches Licht deutlich höher als bei Aluminium. Wird nun der Detektor auch mit dem optischen Licht der LED bestrahlt, so nimmt mit zunehmender Lichtmenge der Unterschied ab und die beiden Meßreihen gehen ineinander über. Dies liegt daran, daß mit zunehmender Lichtmenge die Störstellen abgesättigt werden und die Signalladungen aus beiden Röntgenspektren keine Verluste aufgrund der vorher vorhandenen Störstellen mehr erleiden. Daß die CTE insgesamt nicht den Idealwert von 1 erreicht, liegt am Schiebevorgang selbst.

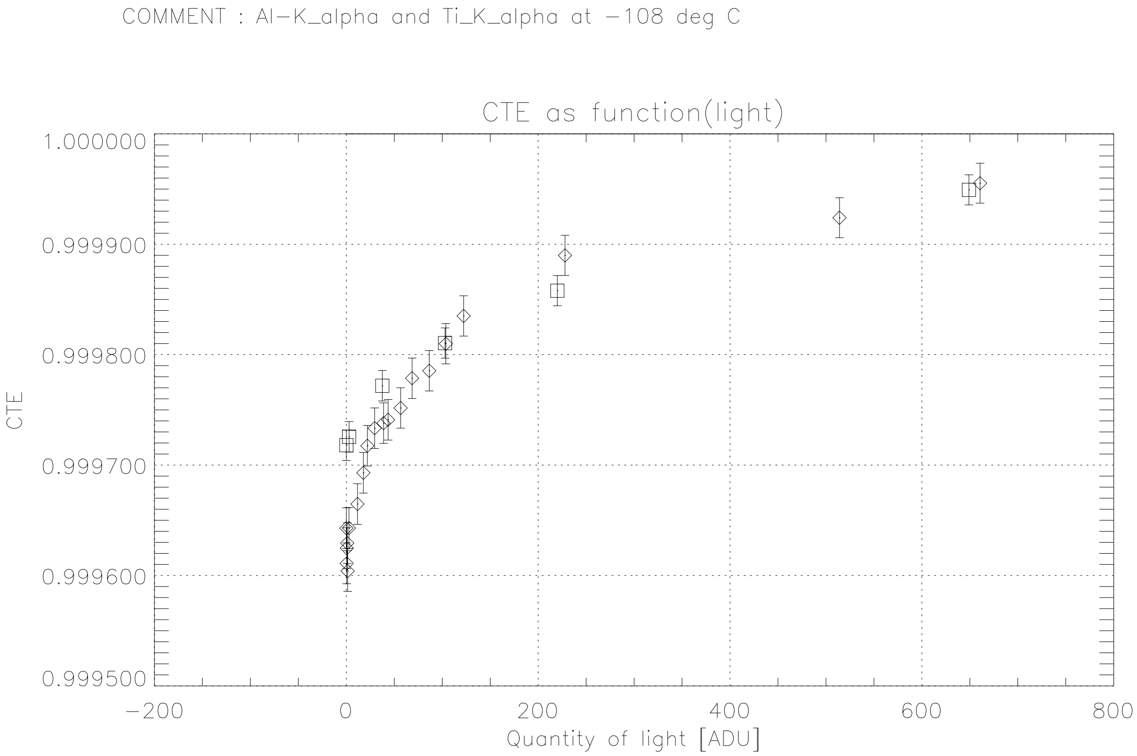


Abbildung 7.16: CTE-Entwicklung bei -108° C mit den Energien der Al-K_α- und Ti-K_α-Spektren. Die Meßpunkte der Titan-Messung sind mit Rechtecken gekennzeichnet, diejenigen aus dem Aluminium-Spektrum mit Romben.

7.6 Folgerungen für die Korrektur der Spektren

Wie schon in Abschnitt 4.4 dargestellt wurde, kann die CTE leicht mit Hilfe einer Flatfield-Belichtung ermittelt werden. Die Nachkorrektur eines reinen Röntgenspektrums mit der so bestimmten CTE ergibt keine Probleme. Da aber bei Orbit-Beobachtungen die Quelle auch im optischen Bereich strahlen kann, ergeben sich daraus Konsequenzen für die CTE-Korrektur. Betrachten wir dies am

Beispiel des Titan-Spektrums welches mit einem optischem Anteil von etwa 38 ADUs (U_{LED} = 1.800 V, siehe Tab. 7.1) aufgenommen wurde. Die Korrektur mit der Flatfield-CTE (0.999739) ergibt für die Peaklage der K_α Linie einen Wert von 953.35 ADUs (siehe Abb. 7.17, S. 60). Da aufgrund der optischen Bestrahlung die CTE veändert wurde (0.999772), ergibt die damit korrigierte Peaklage den Wert 949.22 ADUs. (siehe Abb. 7.18). Dies bedeutet immerhin einen Unterschied von 4.13 ADUs, d.h. mit einer Verstärkung von 0.21 ADU/eV etwa 19.67 eV.

7.7 Verbindung zwischen Lichtmenge und Rauschen

Alle CTE-Bestimmungen in dieser Arbeit wurden auf die zusätzliche optische Lichtmenge, d.h. auf die Offsetdifferenzen bezogen. Wichtig ist aber eine Verbindung zwischen Lichtmenge und Rauschen, dies hat folgenden Grund: bei Beobachtungen mit dem Satelliten ist geplant, vor jeder Beobachtung eine Offset- und Rauschkarte zu berechnen. Die Rauschkarte wird nach jeder Berechnung an die Bodenstation übertragen, nicht jedoch die Offsetkarte. Sollten Rauschwerte größer als 25 ADUs vorkommen, gibt es die Möglichkeit, zusätzliche optische Filter vor den Detektor zu fahren. An Bord gibt es 3 verschiedene Filter: dick, dünn und medium [3]. Außerdem ist auch eine Beobachtung ohne Filter möglich, wird jedoch nicht empfohlen. Grundsätzlich ist optisches Licht ein Hindernis bei jeder Beobachtung, denn es verschlechtert das Auflösungsvermögen des Detektors und reduziert die effektive Fläche des Detektors (siehe Abb. 7.19). Das Problem mit den Filtern ist, daß sie nicht nur optisches sondern auch Röntgenlicht absorbieren. Dies behindert das Beobachten vor allem sehr weicher Quellen, so daß meistens das medium Filter Anwendung finden wird. Dadurch ist eine gewisse Menge an optischer Strahlung nicht zu vermeiden. In dieser Arbeit wurde gezeigt, daß eine gewisse Menge an Licht sogar einen Effekt der CTE-Verbesserung verursacht und somit den Detektor in seiner Leistungsfähigkeit nicht einschränkt.

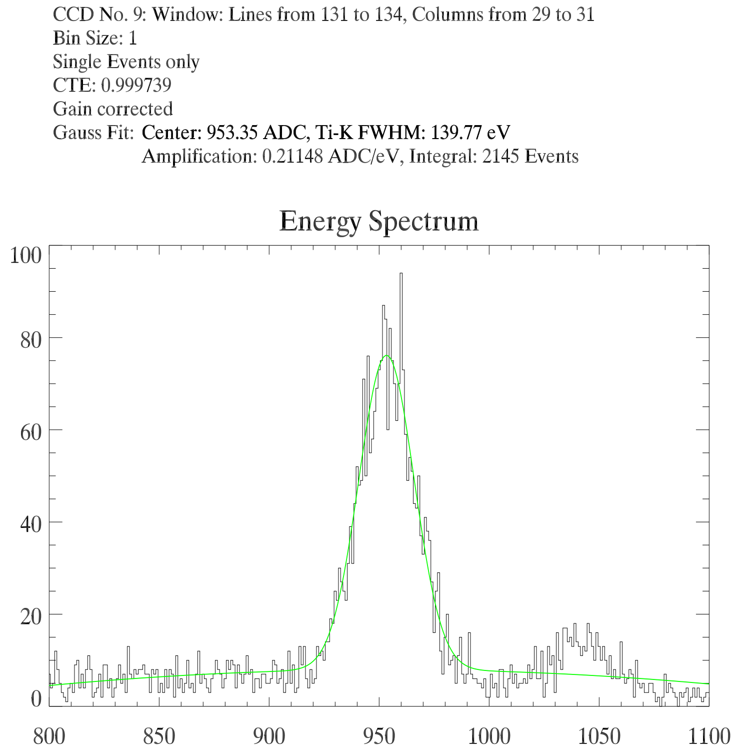


Abbildung 7.17: Ti-Spektrum mit der CTE-Korrektur aus der Flatfield-Belichtung.

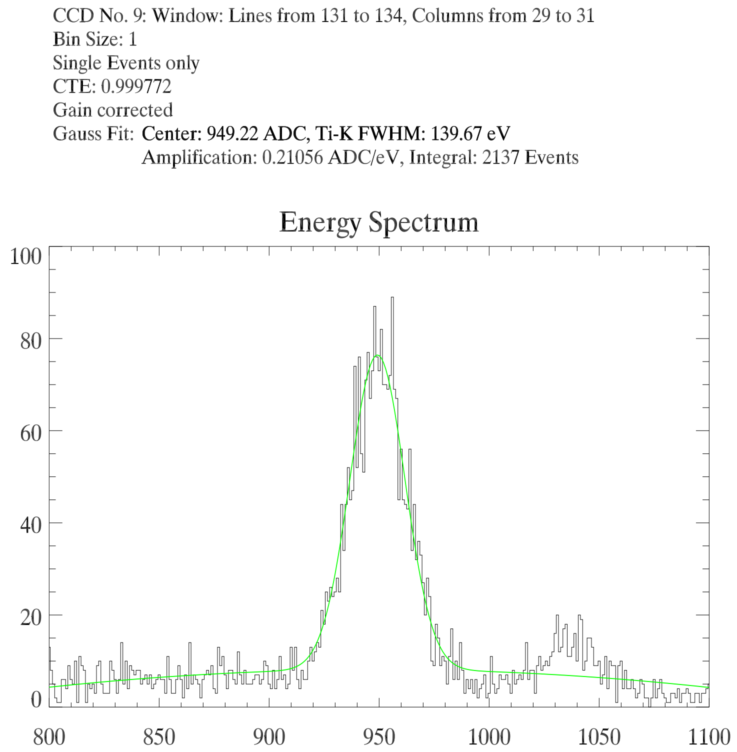


Abbildung 7.18: Ti-Spektrum mit der angepaßten CTE.

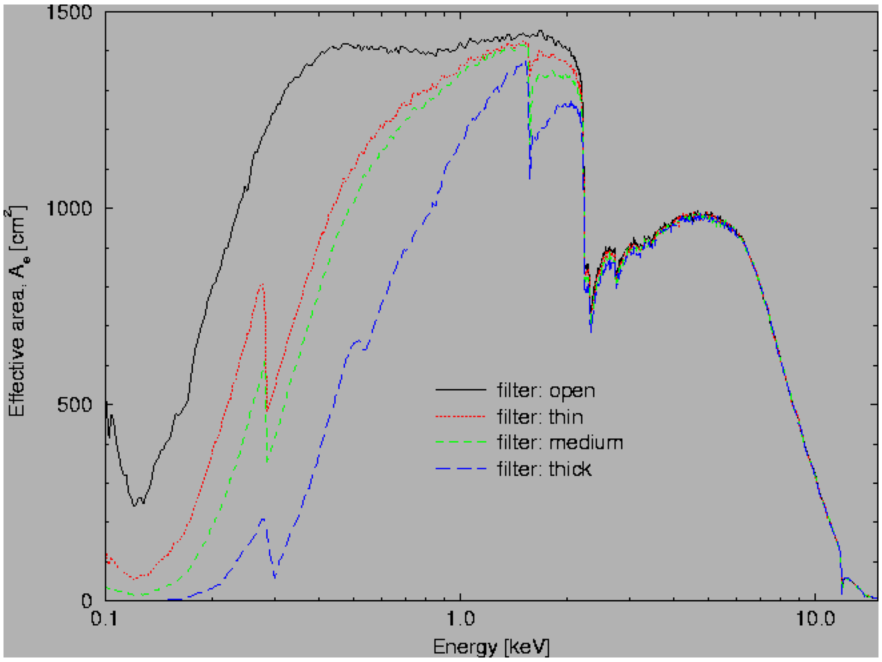


Abbildung 7.19: Effektive Fläche der pn-Kamera plus Teleskop bei verschiedenen Filtern

Kapitel 8

Zusammenfassung und Zukunfsaussichten

Im Laufe der letzten Jahre wurde am IAAT die Möglichkeit geschaffen, die neuartigen pn-CCD-Detektoren eingehend zu prüfen. Von den anfangs funtionalen Tests verlagert sich das Ziel dieser Tests nun in die Richtung der Untersuchung ganz spezieller Eigenschaften der Detektoren. Wie zum Beispiel die Untersuchungen in der vorliegenden Diplomarbeit einer optischen Einwirkung auf die Röntgenspektren.

Bei einer geschätzten Lebensdauer von 10 Jahren des Satelliten XMM besteht die Möglichkeit, daß immer wieder unerklärliche Effekte auftauchen könnten. Da ist es natürlich von Vorteil, wenn dies auf dem Boden nachprüfbar ist. Diese Möglichkeiten bietet die Vakuumtestanlage am IAAT. Außerdem wird die Entwicklung der pn-CCD-Detektoren wohl kaum stehenbleiben, so daß damit wieder neue Untersuchungen angesagt wären.

Aus oben genannten Gründen wird an der bestehenden Testanlage in der Zukunft weiterentwickelt. Geplant sind sowohl der Einbau eines kompletten Kamerakopfes als auch die Verwendung einer neuen Fluoreszenz-Röntgenquelle.

Anhang A

idl-Routinen

```
PRO jpshowoffsetdiff,file1,file2,mincol,maxcol,minline,maxline,$
                     linedist=linedist,coldist=coldist,$
                     maxpeakdiff=maxpeakdiff,meanpeakdiff=meanpeakdiff,$
                     mug=mug,rmsug=rmsug,$
                     led=led,halt=halt,chatty=chatty
```

```
PRO jpoffsetdiff,mincol,maxcol,minline,maxline,$
                 min_light=min_light,max_light=max_light,$
                 min_led=min_led,max_led=max_led,$
                 ps=ps,plotfile=plotfile,halt=halt,$
                 savediff=savediff
```

```
PRO jpspectrum,file,min_energy=min_energy,max_energy=max_energy,$
               mincol=mincol,maxcol=maxcol,minline=minline,maxline=maxline,$
               line=line,comment=comment,plotfile=plotfile,ps=ps,$
               fit=fit,gain=gain,cte=cte,$
               halt=halt,chatty=chatty,$
               peak=peak,fwhm=fwhm
```

```
PRO jppeakpos,min_energy,max_energy,$
              mincol,maxcol,minline,maxline,$
              min_light=min_light,max_light=max_light,$
              min_peak=min_peak,max_peak=max_peak,$
              err=err,asym=asym,$
              ps=ps,plotfile=plotfile,halt=halt,$
              comment=comment,save=save
```

```
PRO jpcte,min_energy,max_energy,row,err$
          min_light=min_light,max_light=max_light,$
          min_cte=min_cte,max_cte=max_cte,$
          comment=comment,ps=ps,plotfile=plotfile
```

Anhang B

Bilder

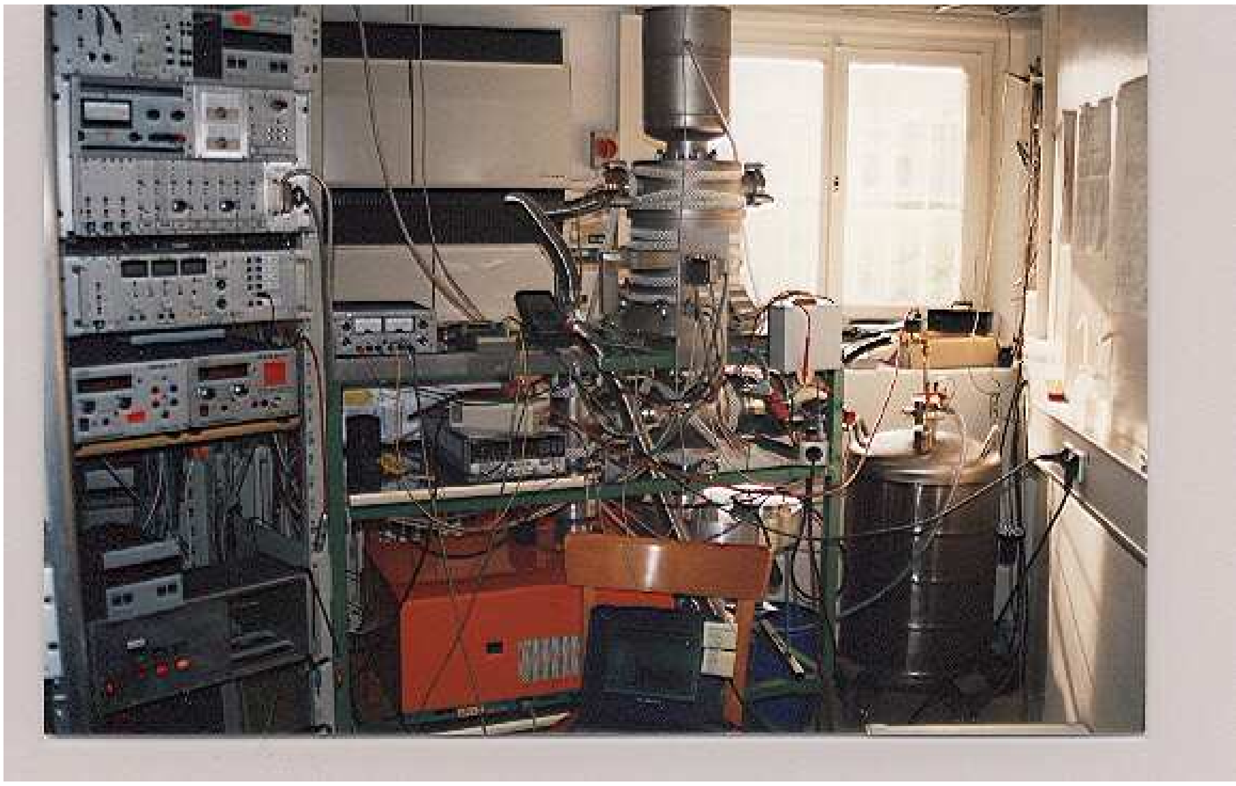


Abbildung B.1: Gesamtansicht der Anlage: links der Rack mit den Spannungsversorgungen, in der Mitte die Vakuumkammer mit dem Kryostaten oben, ganz rechts der Vorratsbehälter mit dem flüssigen Stickstoff

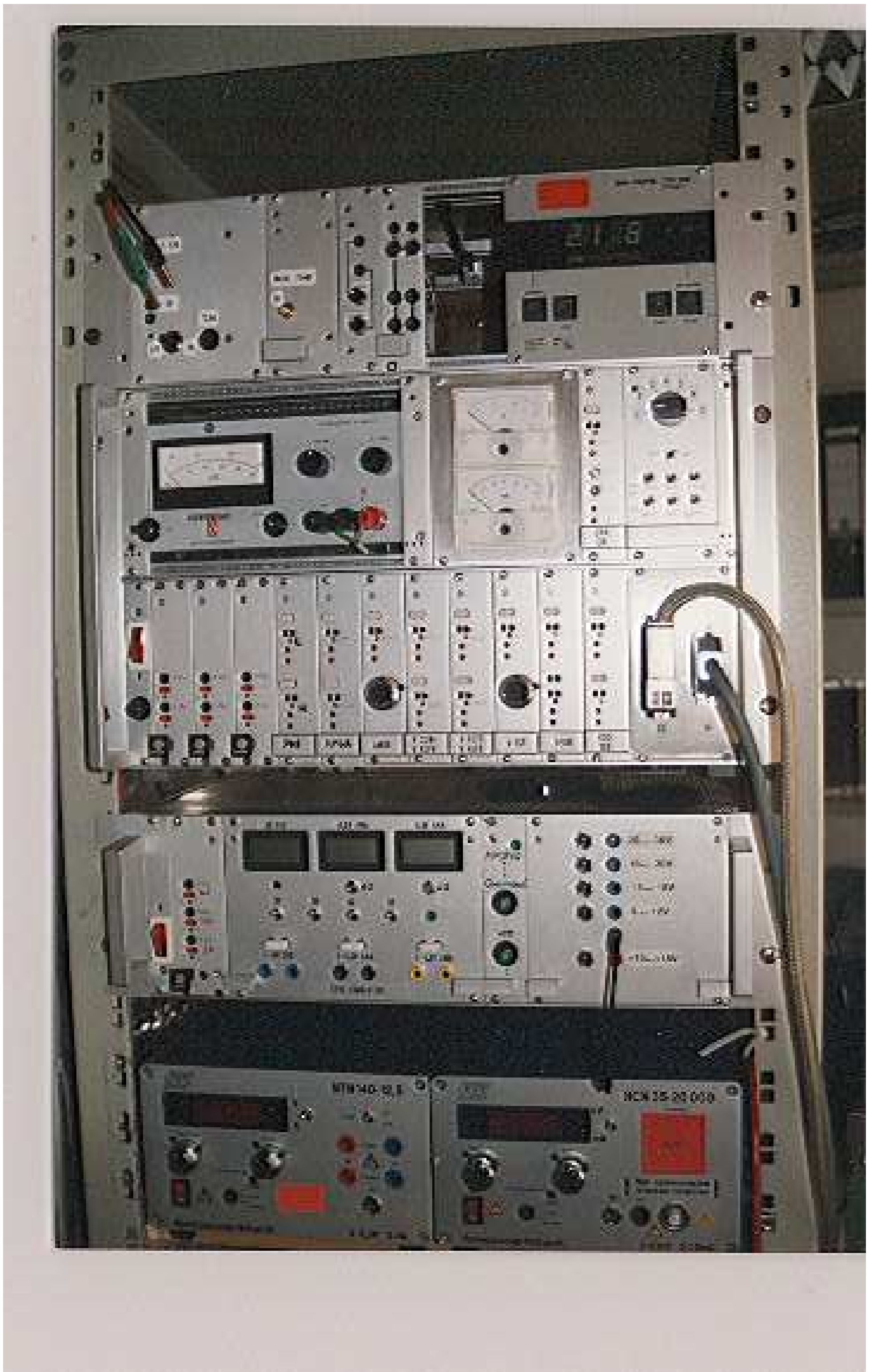


Abbildung B.2: Die Spannungsquellen

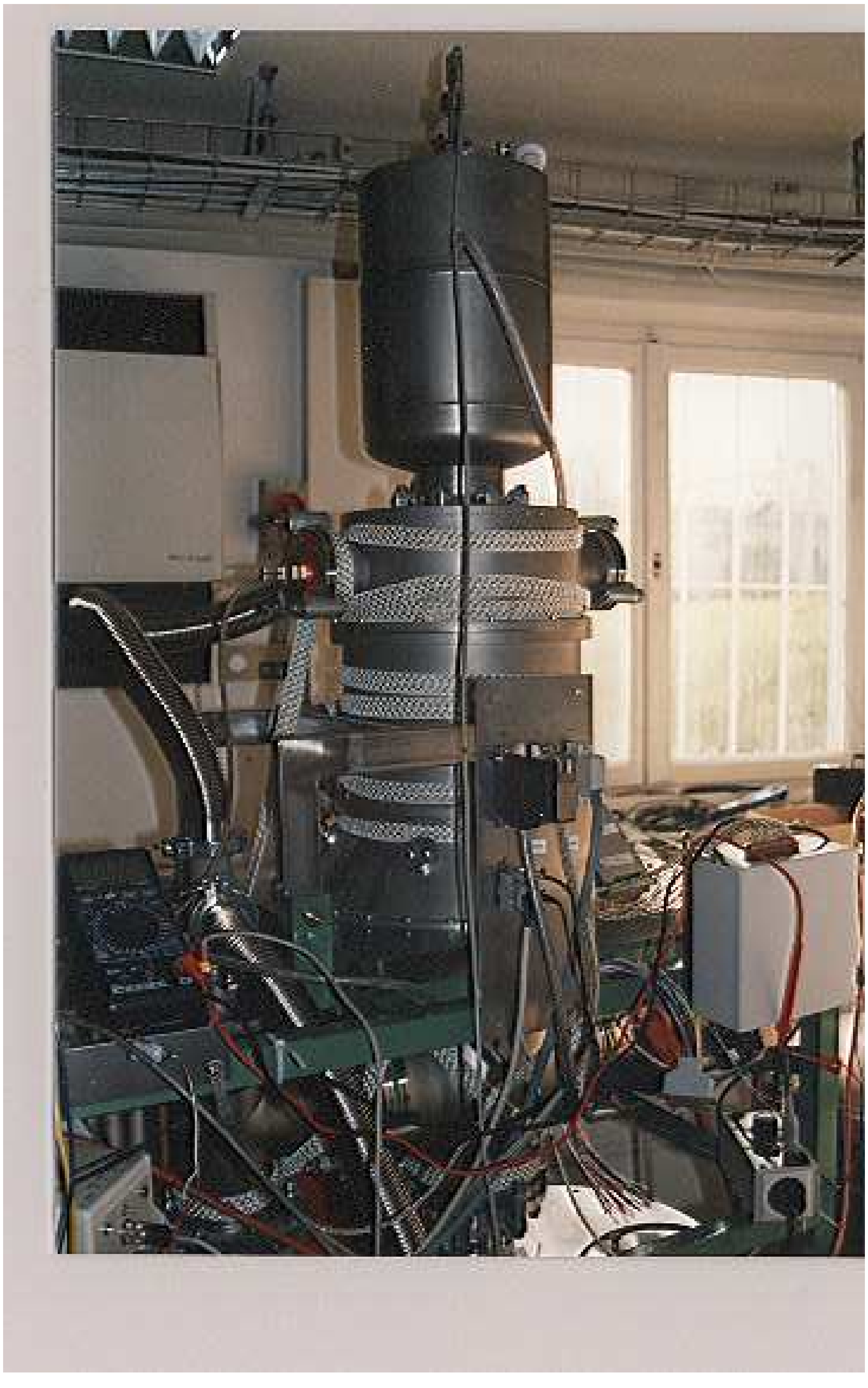


Abbildung B.3: Der Kamerakopf mit dem Kryostaten zum Kühlen

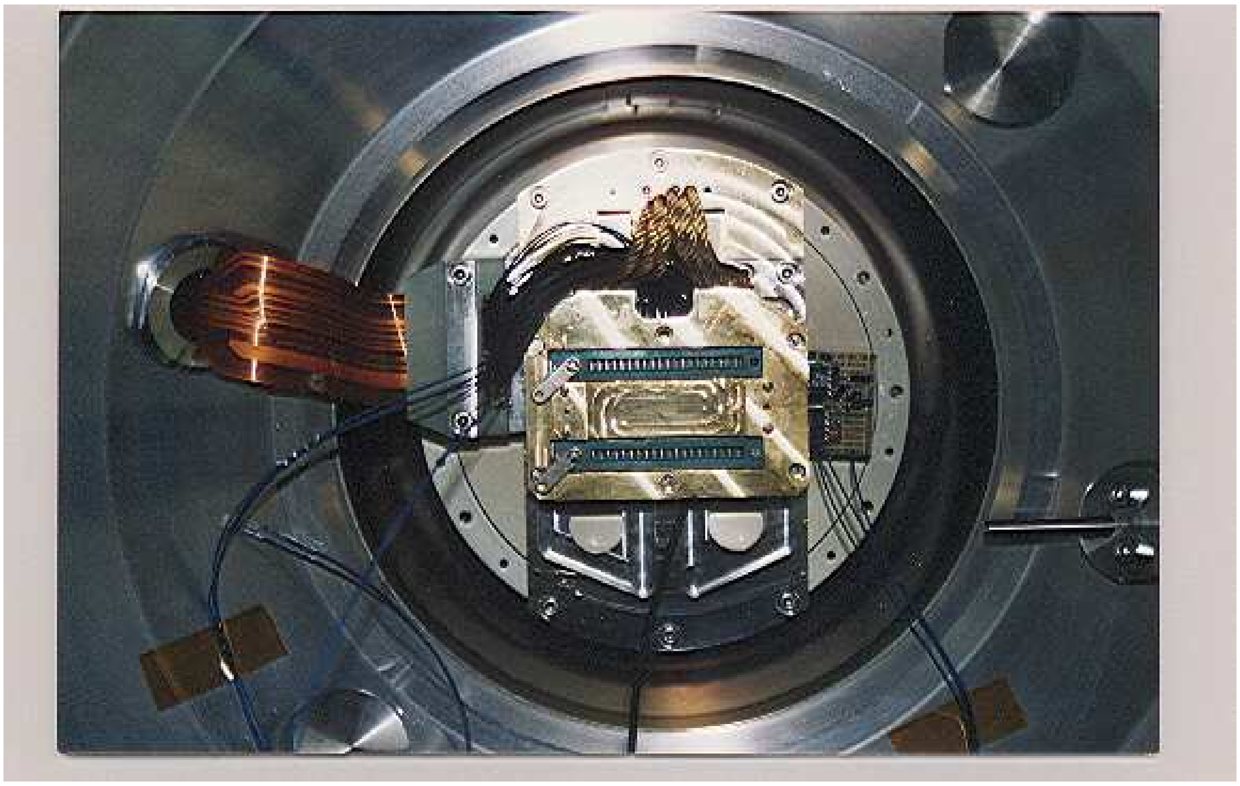


Abbildung B.4: Sockel für den pn-CCD-Detektor: links der Flexlead mit der Vakuumdurchführung, rechts noch erkennbar die Blendenhalterung

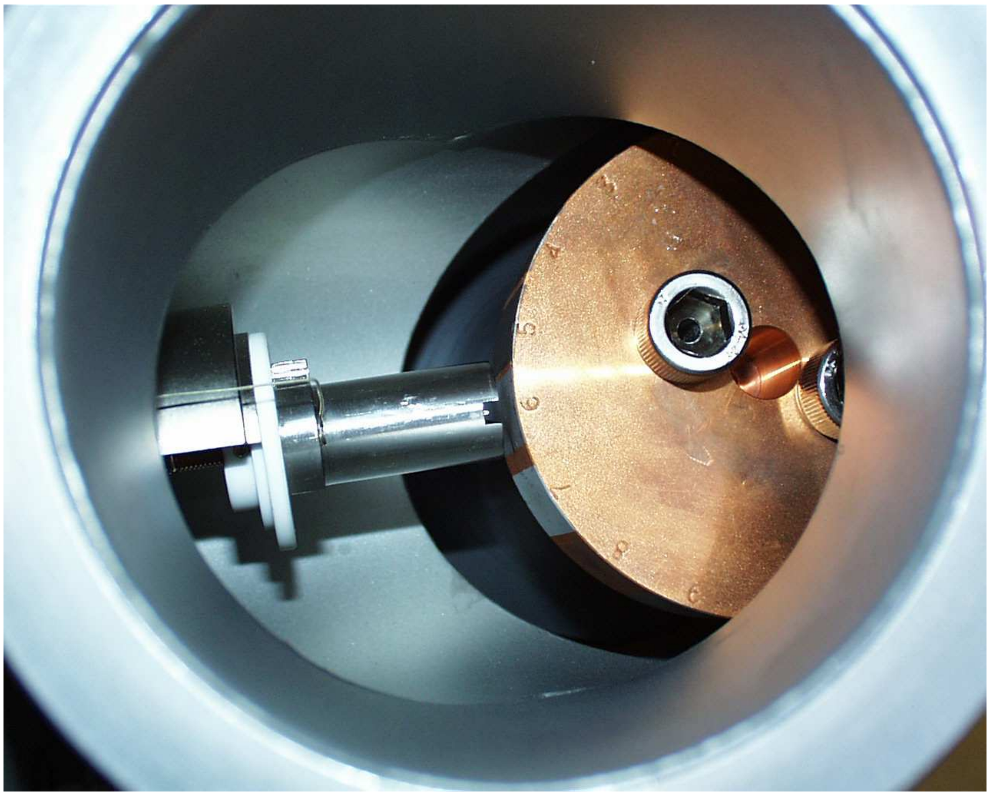


Abbildung B.5: Die Röntgenröhre aus der Sicht des Detektors: links mit der Emissionskathode auf Massepotantial und rechts das Anodenrad auf Hochspannungspotential

Literaturverzeichnis

[1] Martin Bertsch. „Aufbau eines röntgenspektroskopischen Versuchsstandes für pn-CCD-Detektoren im Rahmen der Satellitenmissionen XMM und ABRIXAS". Diplomarbeit, IAAT, 1998.

[2] Edgar Bihler. „Analyse spezieller Effekte beim Auslesen der pn-CCD- Detektoren für die Röntgensatelliten XMM und ABRIXAS". Diplomarbeit, IAAT, 1996.

[3] M. Dahlem. *„XMM Users Handbook"*.

[4] Willy Grubmiller. „Untersuchung eines pn-CCDs für die Röntgensatelliten XMM und ABRIXAS bei unterschiedlichen Temperaturen". Diplomarbeit, IAAT, 1997.

[5] Hermann Hinsch. *„Elektronik, Ein Werkzeug für Naturwissenschaftler"*. Springer-Verlag, 1996.

[6] Markus Kirsch. „Auswertung von Eichmessungen des Röntgen-pn-CCDs für die Satelliten XMM und ABRIXAS". Zulassungsarbeit, IAAT, 1998.

[7] Bärbel Kretschmar. „Entwicklung und Realisierung des Quadranten-Steuerwerks für die pn-CCD-Kamera an Bord der Satelliten XMM und ABRIXAS". Diplomarbeit, IAAT, 1997.

[8] Markus Kuster. „Untersuchung spezieller Eigenschaften des pn-CCD Arrays für die Röntgensatelliten XMM und ABRIXAS". Diplomarbeit, IAAT, 1997.

[9] Richard Martini. „Aufbau eines Messplatzes zur Kalibrierung der integrierten Ausleseeinheit CAMEX64 für Röntgen-CCDs". Diplomarbeit, IAAT, 1993.

[10] N. Meidinger, H. Bräuninger, R. Hartmann, et al. „PN-CCD detector for the European Photon Imaging Camera on XMM.

[11] Fritz Regler. *„Einführung in die Physik der Röntgen und Gammastrahlen"*. Verlag Karl Thiemig KG, München, 1967.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Vielen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben. Insbesondere bei folgenden:

Prof. Dr. R. Staubert für die Vergabe und Korrektur dieser Arbeit,

Dr. E. Kendziorra für die gute und angenehme Betreuung, für eine immer offene Tür und für die vielen wertvollen Anregungen wenns mal nicht weiterging,

S. Vetter aus der Elektronik für die sehr gute Zusammenarbeit und immer präsente Hilfsbereitschaft,

W. Gäbele und K. Lehmann für die Versorgung mit Stickstoff über die ganzen Monate hinweg und die Hilfe bei der Bewältigung der technischen Probleme der Vakuumanlage,

Markus Kuster für die immer dagewesene Hilfe bei der Auswertung der Meßdaten und die ersten Schritte in idl,

allen **Mitgliedern des Astronomischen Instituts** für das angenehme Arbeitsklima, die vielen Espressorunden und die bewegenden Momente des Donnerstagsfußballs,

und natürlich **meinen Eltern** für die immer bedingungslose Unterstützung während des ganzen Studiums. Ohne sie wäre ein Studium in dieser Form gar nicht möglich gewesen.