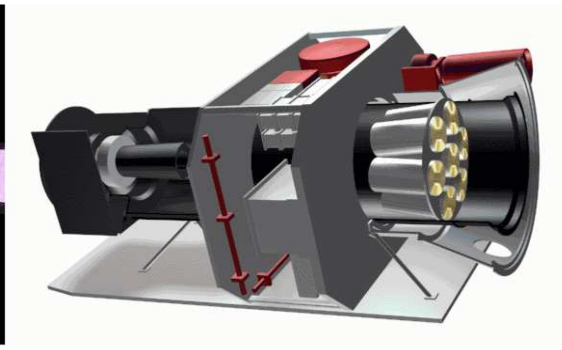
# Untersuchung spezieller Eigenschaften des pn-CCD Arrays für die Röntgensatelliten XMM und ABRIXAS

Diplomarbeit

vorgelegt von


Markus Kuster

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


15. Februar 1997

# Inhaltsverzeichnis

# Abbildungsverzeichnis

# Tabellenverzeichnis

# Kapitel 1

# Einleitung

## 1.1 Wissenschaftliche Ziele von XMM und ABRIXAS

In den vergangenen Jahren haben sich die wissenschaftlichen Zielsetzungen in der Astronomie und Astrophysik stark geändert. Während in den Anfängen der Astronomie nur Beobachtungen im optische Spektralbereich durchgeführt wurden, rücken heute immer mehr andere Spektralbereiche, wie die der Infrarot-,Radio-, UV-, Röntgen- und Gammastrahlung in den Vordergrund. Viele der wichtigsten Probleme der modernen Astrophysik können in ihrer Erklärung durch Beobachtungen in diesen Energiebereichen unterstützt werden. Dazu sind die Wissenschaftler auf Instrumente angewiesen, die unter anderem den Spektralbereich der Röntgenstrahlung abdecken. Zwei dieser Instrumente, die für die nahe Zukunft geplant sind, sind der von der ESA geplante Großsatellit XMM und das Kleinsatellitenprojekt ABRIXAS der DARA. Ein großer Vorteil dieser beiden Instrumente ist der erweiterte Spektralbereich (0.1-10 keV) im Vergleich zu früheren Missionen mit abbildenden Teleskopen, wie das "Einstein Observatory" und ROSAT. Dadurch werden auch stark absorbierte Quellen beobachtbar, die im niederenergetischen Röntgenbereich nicht sichtbar sind.

Einige Beispiele aktueller Themen, zu denen Röntgenastronomie und damit auch XMM und ABRIXAS in ihrem Verständnis Beiträge leisten sollen, sind hier zusammengefaßt:

- Röntgenhintergrundstrahlung

  Die extragalaktische Röntgenhintergrundstrahlung, die vor etwa 30 Jahren entdeckt wurde, wurde schon mit mehreren Röntgeninstrumenten untersucht. Speziell die Satelliten HEAO 1 und 2 und ROSAT waren dabei sehr erfolgreich. Im Energiebereich von 3 bis 100 keV kann das Spektrum der Hintergrundsstrahlung sehr gut durch ein optisch dünnes Bremsstrahlungsmodell mit kT $\approx$ 40 keV angenähert werden. Zu niedrigeren Energien hin wurden allerdings zusätzliche neue Komponenten beobachtet, die noch nicht vollständig verstanden sind. Hier soll insbesondere die Himmelsdurchmusterung von ABRIXAS im Energiebereich von 0.5-10 keV weitere Erkenntnisse liefern.

- Aktive Galaxienkerne (AGN)

  Eine sehr wichtige Rolle unter den Röntgenquellen spielen die AGNs, in deren Kernregion extrem massereiche Schwarze Löcher vermutet werden, die Materie aus der sie umgebenden Galaxien akkretieren. Die einzige direkte Beobachtungsmöglichkeit des Zentralbereichs solcher AGNs bietet die von ihnen emittierte Röntgenstrahlung. Diese wechselwirkt mit der den AGN umgebenden Materie. Anhand detaillierter Untersuchungen der Röntgenspektren können Informationen über die Massenakkretion gewonnen werden.

- Absorbierte AGNs

  In den vergangenen Jahren wurde deutlich, daß sich die unterschiedlichen Klassen von AGNs, speziell Seyfert-1 und Seyfert-2 Galaxien, durch unterschiedliche Geometrien erklären lassen. Während bei Seyfert-1 Galaxien das Blickfeld direkt auf die aktive Kernregion gerichtet ist, ist bei Seyfert-2 Galaxien die Zentralregion durch einen dicken Gas- und Staubtorus verdeckt. Diese Theorie wurde vor allem kürzlich durch die aktuellen Beobachtungen von Seyfert Galaxien durch das "Hubble-Space Telescope" unterstützt. Die Bilder, die das Space Teleskop bei direkten Beobachtungen von Seyfert Galaxien aufgenommen hat, zeigen einen Staubtorus im Zentrum der AGNs. Die geometrischen Verhältnisse wirken sich natürlich stark auf das Röntgenspektrum aus. Bei Galaxien vom Seyfert-2 Typ wird erwartet, daß niederenergetische Röntgenstrahlung durch die dicken Staub und Gasschichten absorbiert wird und nur Strahlung höherer Energie ($\geq$ einige keV) beobachtbar ist.

- Galaktische Röntgenquellen

  Wie der ROSAT all-sky survey gezeigt hat, wird niederenergetische Röntgenstrahlung in Richtung der galaktischen Ebene durch dichte Wolken neutralen Gases stark absorbiert. Es wird erwartet, daß viele Röntgenquellen, die im Bereich der niederenergetischen Röntgenstrahlung bisher nicht beobachtbar waren, in einer Himmelsdurchmusterung im Bereich von 0.5-10 keV nachgewiesem werden können. Ein weiteres Ziel ist die Entdeckung ausgedehnter Röntgenquellen mit geringer Flächenhelligkeit, wie Supernovaüberreste oder andere Gebiete heißen Gases. Auch Langzeitbeobachtungen von kataklysmischen Veränderlichen und Röntgendoppelsternen in verschiedenen Zeitskalen von Minuten bis Jahren sind Ziele der neuen Instrumente.

- Akkretionsmechanismen in Doppelsternsystemen

  Akkretionsmechanismen spielen vor allem bei Röntgendoppelsternen (X-Ray Binaries) und Kataklysmischen Veränderlichen (CV) eine Rolle. Dies sind Systeme die aus einem kopakten Objekt und einem Begleitstern bestehen. Bei diesen Doppelsternen kommt es zu einem Materiestrom zwischen dem Begleiter und dem kompakten Objekt, wobei ein Teil der kinetischen Energie des Materiestroms in Röntgenstrahlung umgesetzt wird.

- Dunkle Materie

  Die Existenz von dunkler Materie ist zur Zeit eines der wichtigsten Probleme der Astrophysik. Die Röntgenspektroskopie bietet die Möglichkeit, die Verteilung der gravitativ wechselwirkenden Materie durch Messungen der Dichteverteilung und des radialen Temperaturprofils von heißem Gas in Galaxienhaufen zu bestimmen.

Zur Untersuchung der Röntgenquellen werden bei XMM und ABRIXAS ortsauflösende pn-CCD Detektoren in der Fokalebene abbildender Röntgenteleskope verwendet. Sie ermöglichen Beobachtungen in einem erweiterten Energiebereich mit deutlich besserer Energieauflösung als bisherige Instrumente.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war es im Rahmen der Detektorentwicklung für XMM und ABRIXAS einen Vakuumteststand für ein CCD-Array zu bauen und die Eigenschaften eines CCD-Arrays an den Grenzen zwischen den Quadranten und zwischen den einzelnen CCDs zu untersuchen. Bevor die Ergebnisse der Arbeit besprochen werden, soll in den nun folgenden Kapiteln ein Überblick über den Aufbau und die Instrumente an Bord von XMM und ABRIXAS gegeben werden. Speziell wird in Hinblick auf das pn-CCD der Kamerakopf von EPIC (EPCH) näher beschrieben werden [CLK+96][LELP96].

# Kapitel 2

# Die Röntgensatelliten XMM und ABRIXAS

## 2.1 XMM (X-Ray Multi Mirror Mission)

XMM ist nach dem leider gescheiterten CLUSTER das zweite Hauptprojekt, ein sogenanntes "Conerstone"-Projekt der ESA aus ihrem Langzeitprogramm "Horizont 2000". Die ESA entwickelt mit XMM ein hochauflösendes Röntgenexperiment, das einen breiten Energiebereich von 0.1 bis 15 keV abdeckt. Die Entwicklung und der Bau von XMM wird von mehreren europäischen Firmen und Instituten übernommen. Der Satellit wird unter Leitung der Firma Dornier gebaut, die Teleskope in Media Lario gefertigt und die Entwicklung der Instrumente unterliegt den einzelnen Instituten.

**Abb. 2.1:** Der Satellit XMM. Auf der Vorderseite sind die drei Öffnungen der Wolterteleskope zu sehen. Am hinteren Ende des Satelliten befindet sich die Fokalebene, in einer großen Box. Quelle: ESA

### 2.1.1 Der Satellit

XMM hat eine Masse von 3.9 t und gehört damit zu den größten wissenschaftlichen Satelliten. Die technischen Spezifikationen für die Einzelkomponenten sind so ausgelegt, daß im schlechtesten Fall ("worst case design") eine Lebensdauer von 2 Jahren gewährleistet ist. Erwartet wird aber eine Funktionalität des Satelliten, die einen Betrieb über einen Zeitraum von 10 Jahren ermöglicht. Im August 1999 soll XMM mit einer Ariane 5 Trägerrakete, trotz deren Fehlstart im Sommer 1996, auf seinen hoch exzentrischen Orbit gebracht werden. Die Entfernung zur Erde beträgt im Apogäum des Orbits 114.000 km und im Perigäum 7.000 km. Der Orbit von XMM ist so gewählt, daß bei einer Periode von 48 h über 40 h für Beobachtungen genutzt werden können. Die hohe Exzentrizität ist notwendig, um langandauernde pointierte Beobachtungen schwacher Röntgenquellen außerhalb des van Allenschen-Stahlungsgürtels zu ermöglichen. Die Steuerung des Satelliten wird vom Kontrollzentrum der ESA, dem European Space Operation Center (ESOC) in Darmstadt übernommen.

XMM ist einer der Nachfolgesatelliten des 1990 gestarteten Röntgensatelliten ROSAT, der gegenüber XMM aber einen deutlich eingeschränkten Spektralbereich von 0.1 bis 2.5 keV hattte. Allerdings wird der von ROSAT erstellte Röntgenkatalog zur Auswahl von Quellen herangezogen, die von XMM beobachtet werden sollen.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Telescope** | | **Pointing** | specified | goal |
| Focal length | 7.5 m | Solar aspect angle pitch/roll | 20° | 20° |
| Field of view (half cone) | 15 arcmin | Absolute pointing error | 60 " | |
| Number of mirror modules | 3 | Absolute pointing drift (16 h) | 45 " | 2 " |
| Mirror shells per module | 58 | Absolute pointing drift (1 h) | 5 " | |
| Carrier/effective surface | Nickel/Gold | Relative pointing error (2 min) | 5 " | 2 " |
| Reflective area at 1.5/8 keV | 4425/1740 cm$^2$ | Relative pointing error (10 sec) | | 0.25 " |
| Mirror shell thickness | 0.47-1.07 mm | Absolute measurement accuracy | 10" | 1 " |
| **Mass** | | **Power** | | |
| Total spacecraft | 3900 kg | Solar array BOL | 1945 W | |
| Experiments | 600 kg | EOL | 1600 W | |
| Mirror modules | 1420 kg | Batteries | 18 Ah (each) | |
| Hydrazine | 485 kg | Experiments | 360 W | |
| **Thermal control** | | **Data management** | | |
| Mirror module heating | 100 W (2x) | Telemetry rate (S-band) | 70 kbps | |
| Mirror support platform | 72 W | Experiment allocation | 64 kbps | |
| Passive thermal control | | Telecommand rate (S-band) | 2 kbps | |
| with safeguard heaters | | Transmitter power | 5 W | |
| **Orbit** | | **Operations** | | |
| Period | 47.8 hr | Launch date | August 1999 | |
| Apogee | 11400 km | Minimum observation altitude | 40000 km | |
| Perigee | 7000 km | Coverage | > 40 hr/orbit | |
| Inclination | 70° | Launcher | Ariane 5 | |
| Argument of perigee | 300° | Nominal mission duration | 2 years | |
| Right ascension of ascending node | 43° | Extendet mission duration | 10 years | |
| Maximum eclipse duration | 1.3 hr | | | |

**Tab. 2.1:** Die wichtigsten Daten über XMM. Quelle: [LELP96]

Die Röntgenoptik von XMM besteht aus drei abbildenden Röntgenteleskopen vom Typ Wolter 1. Sie decken den Energiebereich von 0.1-15 keV ab. Die Wolterteleskope sind aus 58 ineinandergeschachtelten Spiegelschalen aufgebaut, die die Strahlung bei streifendem Einfall in einer Brennebene fokussieren. Die Brennweite der Röntgenoptik beträgt 7.5 m. Eines der herausstechendsten Merkmale des Teleskops ist die hohe effektive Sammelfläche für Photonen, die 4425 cm$^2$ bei 1.5 keV und 1740 cm$^2$ bei 8 keV beträgt. XMM besitzt damit die größte effektive Sammelfläche aller bis zum Ende dieses Jahrhunderts geplanten Röntgenexperimente. Neben einer guten Energieauflösung bietet XMM auch eine sehr gute zeitliche Auflösung. Weitere wichtige Daten von XMM sind in Tabelle 2.1 zusammengefaßt.

### 2.1.2 Die Instrumente auf XMM

Auf XMM sind insgesamt drei Instrumentensysteme integriert: EPIC, ein Reflektionsspektrometer und ein optischer Monitor. In Abbildung 2.2 sind die Instrumente und ihre Untersysteme dargestellt.

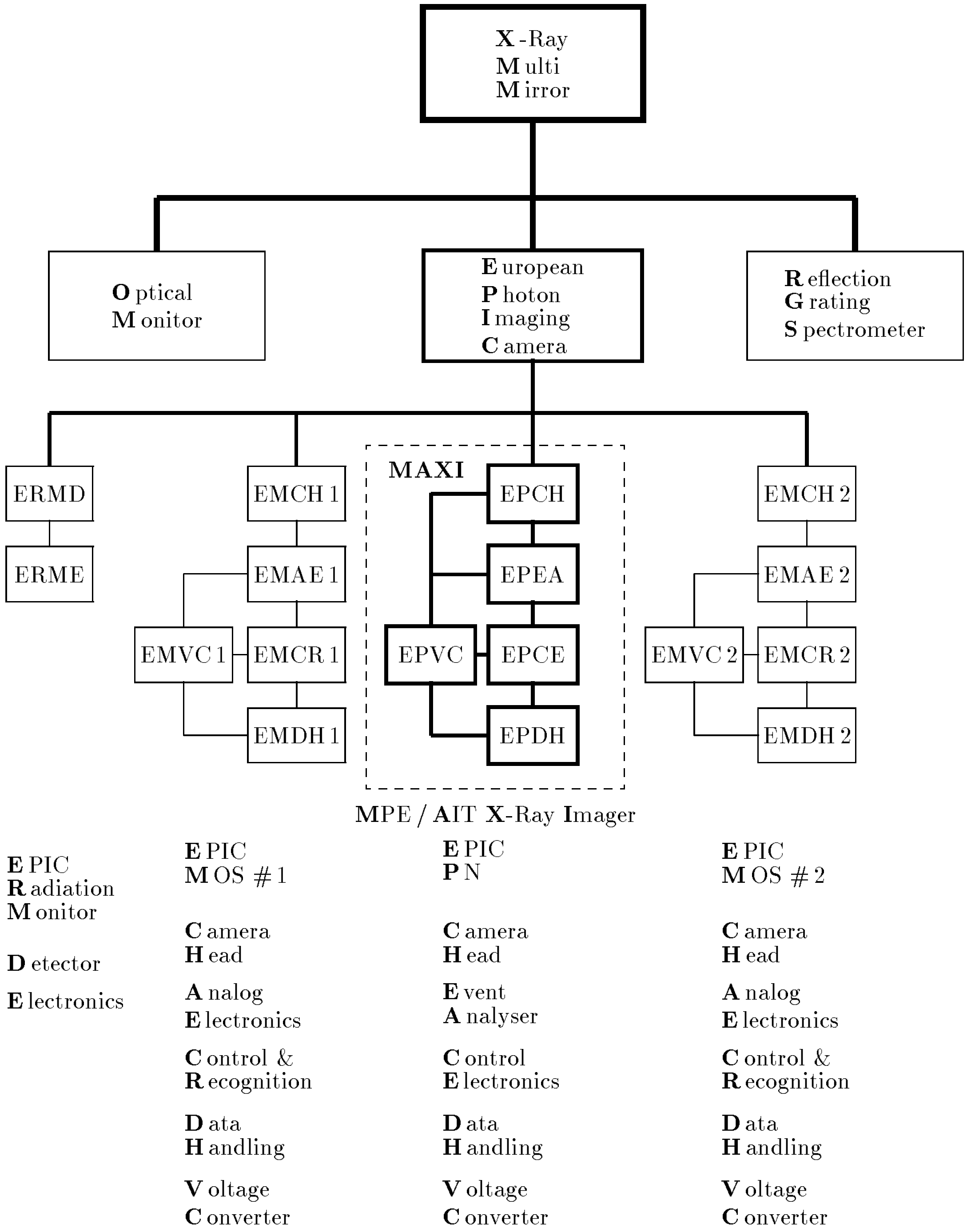



**Abb. 2.2:** Übersicht der Instrumente auf XMM.

### RGS (Reflection Grating Spectrometer)

Das Reflektionsgitterspektrometer wird zur Spektroskopie im Spektralbereich von 0.35-2.4 keV verwendet werden. Dem Spektrometer stehen ungefähr 40 % der gesammelten Photonen von je zwei der drei Spiegelmodule zur Verfügung. Die übrigen transmittierten 60 % werden auf die 2 MOS-CCD Kameras von EPIC fokussiert. Das RGS besitzt eine Energieauflösung von 400 in der ersten Ordnung. Simulationen für das RGS zeigen, daß mit ihm Quellen bis zu einem Strahlungsfluß von $3 \cdot 10^{-13} \frac{\mathrm{erg}}{\mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{s}}$ beobachtet werden können. Als Detektoren werden CCDs eingesetzt, die auf einen Rowland-Kreis mit einem Radius vom 6.7 m angebracht sind.

### OM (Optical Monitor)

Neben den Röntgen Detektoren befindet sich auf XMM ein optischer Monitor der parallel zu den Beobachtungen im Röntgenbereich Beobachtungen im optischen und UV Bereich ermöglicht. Der Monitor besteht aus einem 30 cm Ritchey-Chrétien Teleskop mit einem CCD-Detektor für den Spektralbereich von 1600-5500 Å. Das CCD besitzt 2048 x 2048 Pixel und ist über eine Vielkanalplatte mit dem Teleskop verbunden. Die Empfindlichkeit im Orbit ist vergleichbar mit einem terrestrischen 4 m Teleskop. Möglich sind Beobachtungen bis zu $24^{\mathrm{m}}$ bei einer Belichtungszeit von 1000 s.

Ein solches System ist von großem Vorteil. Es kann wesentlich zum Verständnis physikalischer Prozesse in Röntgenquellen beitragen. Durch simultane Beobachtungen im optischen und Röntgenbereich können nämlich Rückschlüsse auf Quellstrukturen und Emissionsmechanismen gemacht werden. Simultane Beobachtungen von der Erde wären zwar prinzipiell auch möglich, die Erfahrung mit anderen Missionen hat aber gezeigt, daß aus verschiedenen Gründen, z.B. schlechtes Wetter, geplante simultane Beobachtungen in den wenigsten Fällen durchgeführt werden konnten. [MCH96]

### EPIC (European Photon Imaging Camera)

Das EPIC Kamerasystem setzt sich zusammen aus zwei MOS[1]-CCD Kameras und einer pn-CCD Kamera ( MAXI-**MPI**/**A**IT **X**-Ray **I**mager). Die MOS-CCD-Detektoren werden in England von der Universität Leicester in Zusammenarbeit mit EEV entwickelt. Die Auslese- und Verabeitungselektronik für diese Detektoren wird in Frankreich hergestellt. MAXI wird in gemeinsamer Arbeit des Max-Plack-Instituts für Extraterrestrische Physik in Garching und des Instituts für Astronomie und Astrophysik in Tübingen entwickelt.

| Parameter | MOS-CDD | pn-CCD |
|---|---|---|
| CCD Format | 7 CCDs | 12 CCDs |
| Pixel (each CCD) | 600 x 600 | 64 x 200 |
| Pixelsize | 40 x 40 $\mu$m | 150 x 150 $\mu$m |
| (arcsec) | 1.1 x 1.1 | 4.1 x 4.1 |
| Field of view | 33.5 x 33.5 | 27.5 x 27.5 |
| (arc min) | (max) | |
| Full field time | 3 | 0.0558 (without |
| resolution (sec) | | integration) |
| Timing Resolution | 1 ms | 40 $\mu$s |
| Energy | 135 eV @ 6.4 keV | 140 eV @ 6.4 keV |
| Resolution | 55 eV @ 1 keV | 60 eV @ 1 keV |
| Quantum | 87 % @ 6.4 keV | 99 % @ 6.4 keV |
| Efficiency | 65 % @ 8 keV | 97 % @ 8 keV |
| | 45 % @ 0.5 keV | 88 % @ 0.5 keV |
| Operating Temperature | -80° C | -128° C |

**Tab. 2.2:** Performance der EPIC MOS- und pn-Kameras. Quelle: [LELP96]

Die MOS-CCD-Kameras sind aus 7 einzelnen CCDs aufgebaut. Jedes CCD besteht aus 600 x 600 Pixel mit einer Größe von 40 x 40 $\mu$m. Ein Vergleich der Eigenschaften der pn- und MOS-CCD-Detektoren ist in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Die MOS-CCDs teilen sich die beiden Spiegelmodule, die auch vom RGS benutzt werden, und nutzen deshalb nur die verbleibenden 60 % der Intensität der Röntgenstrahlung. Die pn-CCD Kamera MAXI befindet sich hinter dem dritten Wolterteleskop mit freier

[1] MOS: Diese Abkürzung steht für **M**etall **O**xid **S**chicht Technologie

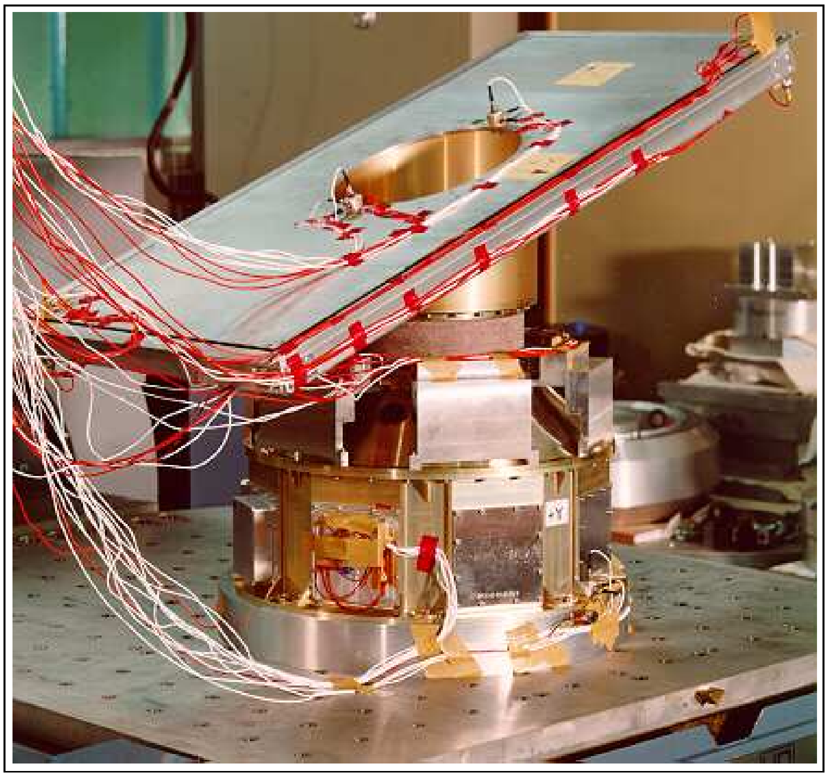


**Abb. 2.3:** Der Kamerakopf (EPCH) bei einem Thermaltest bei der Firma Kayser-Threde.

Öffnung und hat dessen volle Intensität zur Verfügung. Zusätzlich zu den Röntgendetektoren befindet sich in EPIC ein Strahlungsmonitor (Radiation Monitor) zur Detektion von hochenergetischer Teilchenstrahlung. Er dient zur Überwachung von Teilchenstrahlung die ihren Ursprung in solaren Flares hat. Diese Strahlung, die hauptsächlich aus Protonen besteht, kann die CCDs beschädigen. Sie führt dort zu Defekten in der Halbleiterstruktur. Im Fall von zu hoher Strahlungsintensität kann ein Filterrad im Strahlengang der MOS-CCDs in eine geschlossene Position gefahren werden.

### 2.1.3 Das EPIC pn-CCD Kamera System (EPCS)

#### Der EPIC pn-CCD Kamerakopf (EPCH)

Der Kamerakopf (EPCH - **E**PIC **p**n-CCD **C**amera **H**ead) bildet die mechanische Struktur zur Aufnahme des pn-CCDs. Das erste Untersystem des Kamerakopfs ist der Radiator. Beim Flug befindet er sich auf der von der Sonne abgewandten Seite des Satelliten. Er sorgt für die notwendige Kühlung des pn-CCDs auf eine Temperatur von -128° C. Die an mehreren Stellen angebrachten Heizelemente sorgen für die notwendige Temperaturstabilisierung. Vom Radiator aus wird der Kältestrom über einen Kühlfinger auf den Detektor geleitet. Der Kühlfinger ist zur besseren Wärmeisolation von einem Zylinder aus Kohlefaserverbundstoff umgeben, der den Radiator mechanisch stabil gegen den restlichen Kamerakopf abstützt. An der Unterseite des Kühlfingers ist die Halterung für den Detektor montiert.

Direkt vor dem CCD ist ein Protonenschild angebracht, der das CCD vor hochenergetischer Hintergrundstrahlung schützt. Der Schild ist so dimensioniert, daß die Leistungsfähigkeit des CCDs über einen Zeitraum von 10 Jahren hinweg erhalten bleibt.

Das Filterrad vor dem CCD hat sechs verschiedene Einstellungsmöglichkeiten. In der

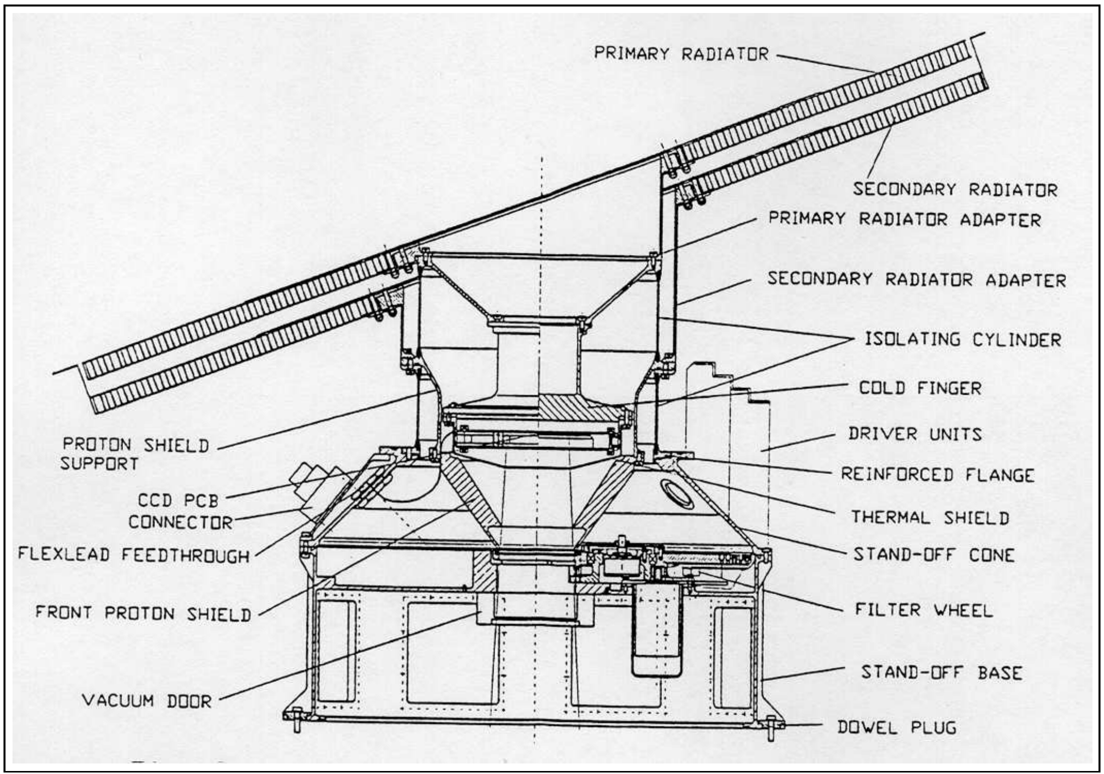



**Abb. 2.4:** Die mechanische Konfiguration des Kamerakopfs.

ersten Stellung befindet sich kein Filter vor dem CCD. In den fünf verbleibenden Positionen kann zwischen verschiedenen Filtern unterschiedlicher Dicke und Materialien gewählt werden. Zusätzlich bietet das Filterrad die Möglichkeit einer geschlossenen Position, die im Falle hoher Intensität der hochenergetischen Hintergrundstrahlung zum Schutz des CCDs gewählt werden kann. Zur Eichung des CCDs ist am Filterrad eine Referenzquelle montiert, die in den Stahlengang gebracht werden kann.

Direkt vor dem Filterrad ist eine Vakuumtür vorgesehen, die beim Start von XMM geschlossen bleibt und ein schwaches Vakuum aufrechterhält. Dadurch werden die sehr empfindlichen Filter vor dem enormen Schalldruck beim Raketenstart geschützt. Über ein Vakuumventil wird der Kamerakopf im Orbit dann entlüftet werden. Diese aufwendige Prozedur ist notwendig, um eine Beschädigung der sehr dünnen Filter zu vermeiden.

In der Anfangsphase des Betriebs werden die verschiedenen Komponenten der EPCH im Vakuum recht stark ausgasen. Die dadurch freigesetzten Kohlenwasserstoffe und Wasserdampf können sich dann auf dem CCD anlagern. Dies hätte eine Verschlechterung der Quanteneffizienz durch Absorption in den Eisschichten zur Folge. Um dem entgegen zu wirken, besteht die Möglichkeit, das CCD auszuheizen, so daß die Verunreinigungen wieder verdampfen.

Die Verbindung zum Spiegelmodul wird über die Instrumentenhalterung hergestellt. An ihr ist der Kamerakopf über den Stand-Off-Cone und die Stand-Off-Base direkt befestigt.

### Die Fokalebene

Die Fokalebene von MAXI besteht aus der CCD-Platine und dem CCD. Beide Komponenten sind auf einem Invarstahlring montiert. Dieser Stahlring ist über eine Halterung direkt mit dem Kühlfinger verbunden. Unter anderem sorgt sie auch für den notwendigen Wärmekontakt zwischen CCD und Kühlfinger.

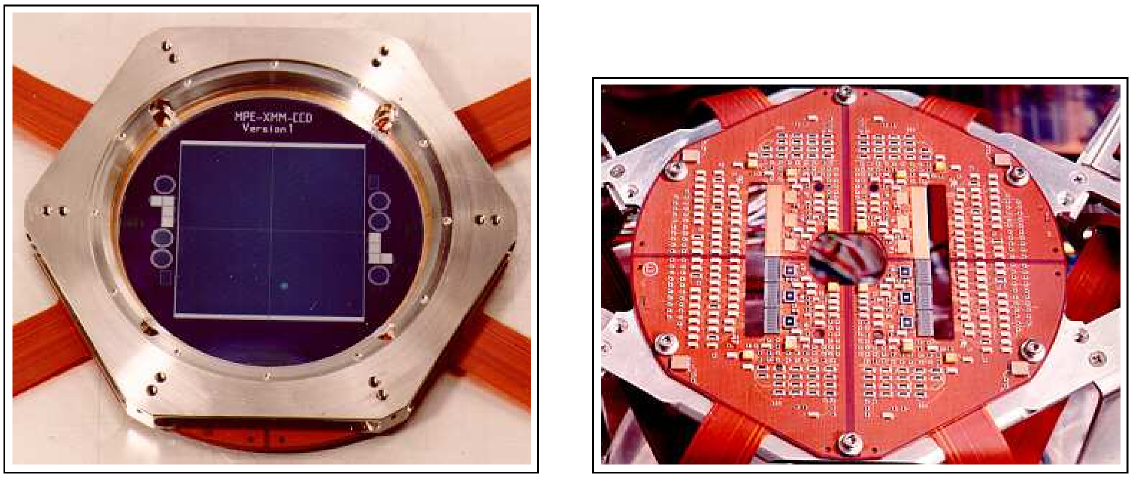



**Abb. 2.5:** Die Fokalebene von XMM. Links: Das pn-CCD in seiner Halterung aus Invarstahl. Rechts: Die CCD-Platine mit den vier Flex-Lead-Leitungen.

Auf der Rückseite der Halterung ist die CCD-Platine befestigt. Auf ihr befindet sich die Vorverstärkerelektronik CAMEXund deren Steuerchip TIMEX. Über flexible Leiterbahnen, sogenannte "Flex-Leads", werden die CCD-Signale aus dem Kamerakopf zur EPEA geführt.

Auf der Vorderseite des Stahlrings ist das pn-CCD-Array fixiert. Die Verbindung zwischen CCD und CCD-Platine wird über Bonddrähte hergestellt, die durch Öffnungen in der CCD-Platine geführt werden (siehe Abbildung 2.5).

### Der Event Analyser EPEA

Der Ereignisanalysator EPEA wird am IAA in Tübingen entwickelt. Er ist für die Ansteuerung des CCDs zuständig. Zusätzlich übernimmt er die Ereigniskorrektur, die Digitalisierung der Signale des CCDs und die Erzeugung der Auslesepulse des CCDs. Ausführlich wird die EPEA-Elektronik im Kapitel 5 behandelt.

### Die Low Voltage Control Unit EPVC und die EPCE

Die EPVC-Elektronik, die wie die EPCE vom MPE in Garching entwickelt wird, gewährleistet die Spannungsversorgung der Elektronikeinheiten EPCE, EPEA und EPCH. Zu diesem Zweck werden von der EPVC mehrere Spannungen generiert, unter anderem wird das CCD von hier aus mit der Rückkontaktspannung versorgt.

Die EPCE übernimmt die Steuerung und Kontrolle dieser Spannungen. Außerdem stellt die EPCE die Verbindung zur EPDH her. Sie bildet die Schnittstelle für Housekeeping und Kommandodaten zur EPDH. Zusätzlich wird von der EPCE die Temperaturstabilisierung des Kamerakopfes überwacht und das Filterrad gesteuert.

### Das Data Handling System EPDH

Die letzte Komponente in der Reihe der Steuerungs- und Datenverarbeitungseinheiten bildet die EPDH. Sie ist für die Koordination der Daten- und Housekeepinginformationen zuständig. Diese Daten werden von der EPDH in den Datenstrom der anderen Satellitenuntersysteme auf dem Satellitenbus eingereiht. Gleichzeitig werden von der EPDH auch die Befehle der Bodenstation verwaltet und an die Untersysteme von MAXI weitergegeben [CLK+96][Cas96][VAA96].

## 2.2 ABRIXAS (A Broad-Band Imaging X-Ray All-Sky Survey)

Finanziert von der DARA (Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten) planen das MPE, das AIP (Astronomische Institut Potsdam) und das IAAT den weiteren Röntgensatelliten ABRIXAS.

ABRIXAS ist als ein sogenanntes Kleinsatelliten-Projekt geplant, in dem teilweise die Technologie von XMM weiterverwendet werden soll. Dadurch fallen die Entwicklungskosten für ein neues Detektorsystem weg.

Die nominelle Missionsdauer von ABRIXAS ist auf 3 Jahre festgelegt und liegt deutlich unter der von XMM. Als Trägersystem wurde die kostengünstige russische COSMOS-Rakete ausgewählt, die ABRIXAS auf eine erdnahe Umlaufbahn unterhalb des Strahlungsgürtels bringen soll.

Im Gegensatz zu XMM wird ABRIXAS keine pointierten Beobachtungen durchführen. Vielmehr ist mit diesem Satelliten eine Himmelsdurchmusterung geplant. Es ist an eine Erweiterung der erfolgreichen ROSAT-Mission zu höheren Energien (0.5 - 10 keV) gedacht. Man erhofft sich, den ROSAT-Katalog um etwa 16000 Quellen erweitern zu können. Vor allem Studien von absorbierten Quellen (z.B. AGNs) und ihrer Verteilung am Röntgenhimmel spielen dabei eine große Rolle. Davon abgesehen wird ABRIXAS auch Studien von diffusen Objekten wie Sternhaufen und Supernovaüberresten erlauben. Zusätzlich sind auch Langzeit-Messungen an hellen Röntgenquellen vorgesehen. Deren Variabilität könnte dann über drei Jahre hinweg verfolgt werden.

Das Spiegelsystem von ABRIXAS entspricht einem auf 1.6 m Brennweite skalierten Spiegelsystem von XMM. Dadurch bleibt der Glanzwinkel der Spiegeloberfläche erhalten. Insgesamt werden 7 Wolterteleskope vom Typ I eingesetzt, wovon jedes einzelne aus 27 Spiegelschalen besteht (siehe Abbildung 2.6). Jeder der 7 Spiegel deckt ein Gesichtsfeld von 40 Bogenminuten ab. Die Winkelauflösung wird bei etwa einer Bogenminute liegen.

Im Fokus der Teleskope befindet sich das auch von XMM verwendete pn-CCD. Geplant ist, die gesamte pn-CCD Kamera MAXI für ABRIXAS nachzubauen [RHF+95],[FHR+96].

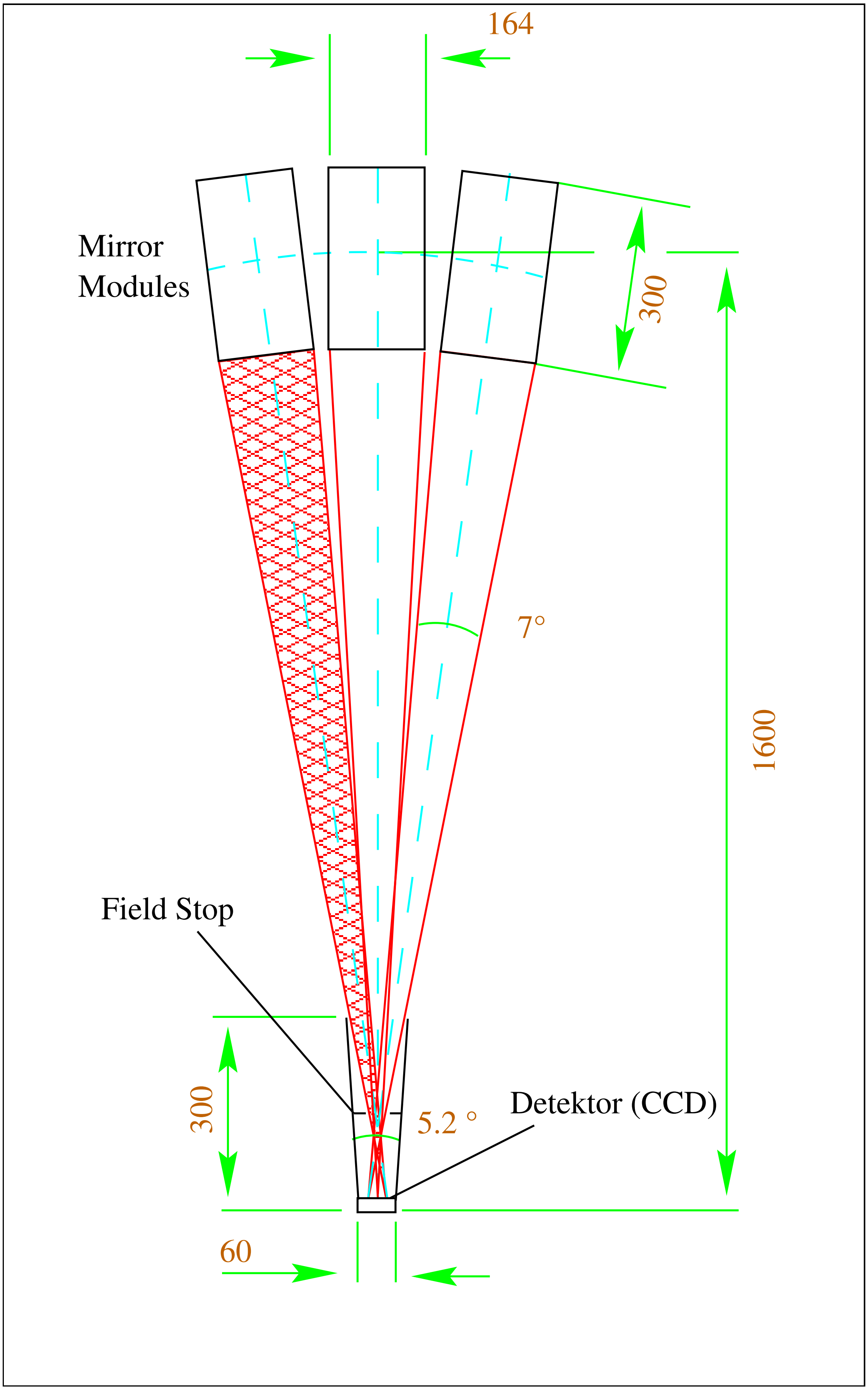



**Abb. 2.6:** Schematische Darstellung der ABRIXAS-Optik.

# Kapitel 3

# Die neue Vakuumtestanlage am IAAT

Bisher stand dem IAAT in Tübingen nur eine Vakuumtestanlage zur Verfügung, in der ein einzelnes CCD betrieben werden kann. Sie wurde 1994 im Rahmen einer Diplomarbeit von Jörg Schaumberger entwickelt und gebaut ([Sch94a]).

Ein Teil der Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit war, eine neue Vakuumanlage zu bauen, in der ein ganzes CCD-Array betrieben und getestet werden kann. Dabei stand im Vordergrund, den Kamerakopf der EPCH in ein System aus speziell gefertigten Vakuumbauteilen und Standartteilen zu integrieren. Teilweise diente die schon am MPE in München in Betrieb genommene Anlage als Vorlage zur Dimensionierung. Unter anderem wurde der Wert des thermischen Widerstands übernommen, der die Verbindung zwischen Kryostat und Kamerakopf herstellt. Im den nun folgenden Abschnitten soll der Aufbau, die dabei auftretenden Probleme und die erreichten Betriebsbedingungen der Anlage beschrieben werden.

## 3.1 Aufbau der Anlage

### 3.1.1 Die Einzelkomponenten

Die Vakuumkammer besteht aus mehreren Einzelkomponenten (siehe Abbildung 3.1), die auf einem fahrbaren Stahltisch montiert sind. Am unteren Teil der Kammer befindet sich ein Meß-Kreuzstück, das mehrere externe Durchführungen aufnehmen kann. Momentan sind hier zwei Drucksensoren montiert, jeweils eine Pirani- und eine Kaltkathodenmeßröhre. Die Pirani-Meßröhre kann Drücke von 1000 bis $10^{-3}$ mbar registrieren. Für Drücke kleiner $5 \cdot 10^{-3}$ mbar wird vom Steuergerät der Meßsonden automatisch auf die zweite Meßröhre, eine Kaltkathoden-Meßröhre, umgeschaltet, deren Meßbereich von $5 \cdot 10^{-3}$ bis $2 \cdot 10^{-9}$ mbar reicht. Neben den Meßröhren ist hier auch das Belüftungsventil der Anlage angebracht, das es ermöglicht, die Kammer mit Stickstoff zu belüften. An der Unterseite des Meßstücks befindet sich eine Drehdurchführung, mit der eine Röntgenquelle, momentan eine $^{55}_{26}$Fe-Probe, in den Strahlengang hinein- oder herausgedreht werden kann (siehe auch 3.1.2).

Seitlich an der Anlage ist die Turbomolekular-Pumpe angebracht. Es handelt sich hierbei um eine ATS 100 Hybridpumpe der Firma Alcatel (technische Daten siehe Anhang B.1). Sie ist luftgekühlt, besitzt eine integrierte Vorpumpe und ist deswegen leicht zu handhaben. Die Pumpe ist über einen Wellbalg mit dem oberen Teil der Kammer verbunden. Dies ist notwendig, da der Kamerakopf den oberen Teil der Kammer gegen den unteren Teil abdichtet. Bei ungleichmäßigem Pumpen würde ein Überdruck entstehen, der zur

Beschädigung des Glasfaserzylinders des Kamerakopfes führen könnte. Der obere Teil der Anlage besteht hauptsächlich aus der Standoffstructure der EPCH und dem Kamerakopf selbst (siehe 2.1.3). Über der Kamera ist ein Stickstoffkryostat (technische Daten siehe Anhang B.3) angebracht, der für die Kühlung der Anlage sorgt. Der Kryostat wird über eine automatische Füllstandsregelung aus einem 60 l Stickstoffvorratsgefäß nachgefüllt. Dies ermöglicht einen ununterbrochenen Betrieb der Anlage über eine Woche hinweg.

An der Standoffstructure selbst ist zusätzlich eine Lineardurchführung montiert, die zur Befestigung von Blenden dient, die in den Strahlengang gebracht werden können. Da vorläufig nur ein Quadrant betrieben werden soll, wird von der Lineardurchführung eine Öffnung verwendet, die eigentlich für die Flexleads der CCD-Platine gedacht ist.

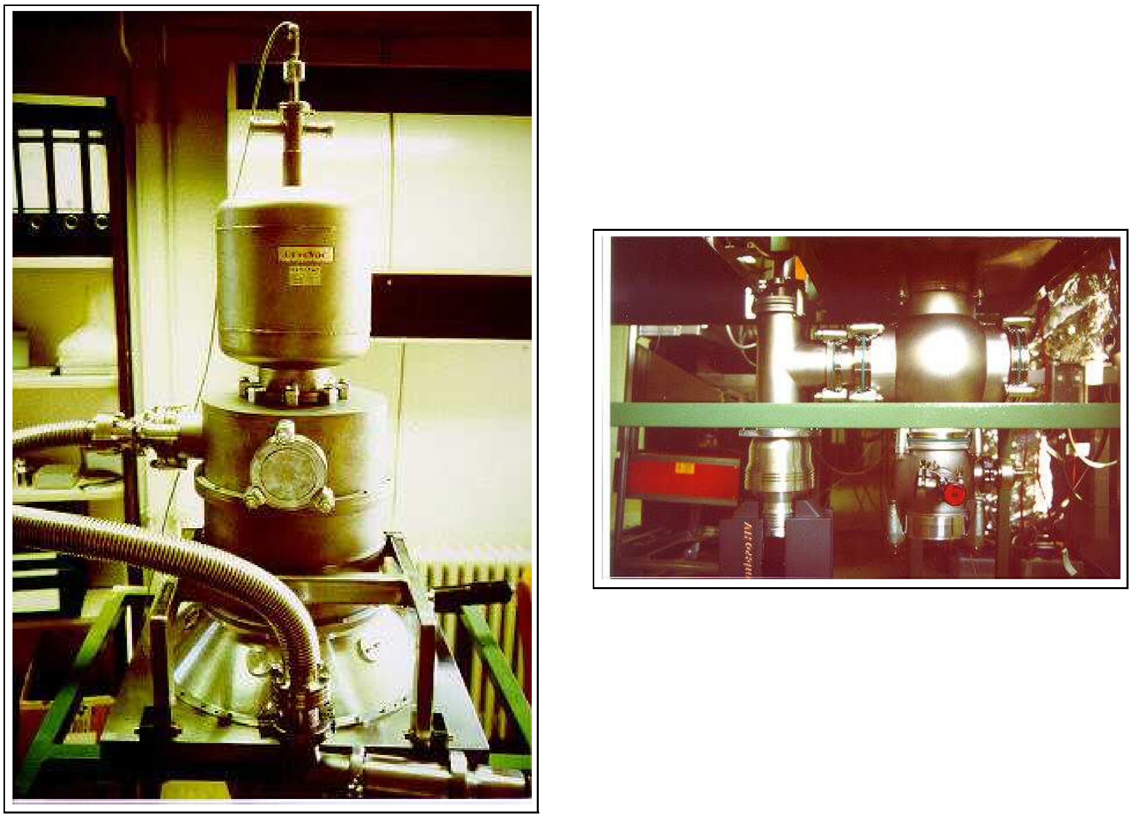


**Abb. 3.1:** Die Vakuumkammer am IAAT. Links: Das Oberteil der Vakuumkammer mit Kamerakopf und Kryostat, rechts: Das Kammer-Unterteil mit dem Strahlengang und der Turbomulekularpumpe.

### 3.1.2 Der Strahlengang

Im unteren Teil der Kammer kann auf einer Drehscheibe eine Röntgenquelle befestigt werden. Sie wird durch Drehen an der Vakuumdurchführung in den Strahlengang hinein oder heraus gebracht. Vor der Quelle befindet sich eine Aperturblende, die einen Teil des Strahls ausblendet und dadurch den Strahldurchmesser verändert. Bei der Verwendung einer kreisförmigen Aperturblende bewirkt eine Halbierung des Strahldurchmessers eine Verringerung der Intensität um den Faktor 4. Dieser Aufbau soll möglichst eine Flat-Field Beleuchtung des CCDs ermöglichen. Vor dem CCD ist an der Drehdurchführung eine Blendenhalterung angebracht. Es gibt verschiedene Varianten dieser Blende u.a. Loch-, Stich- und Buchstabenblenden.

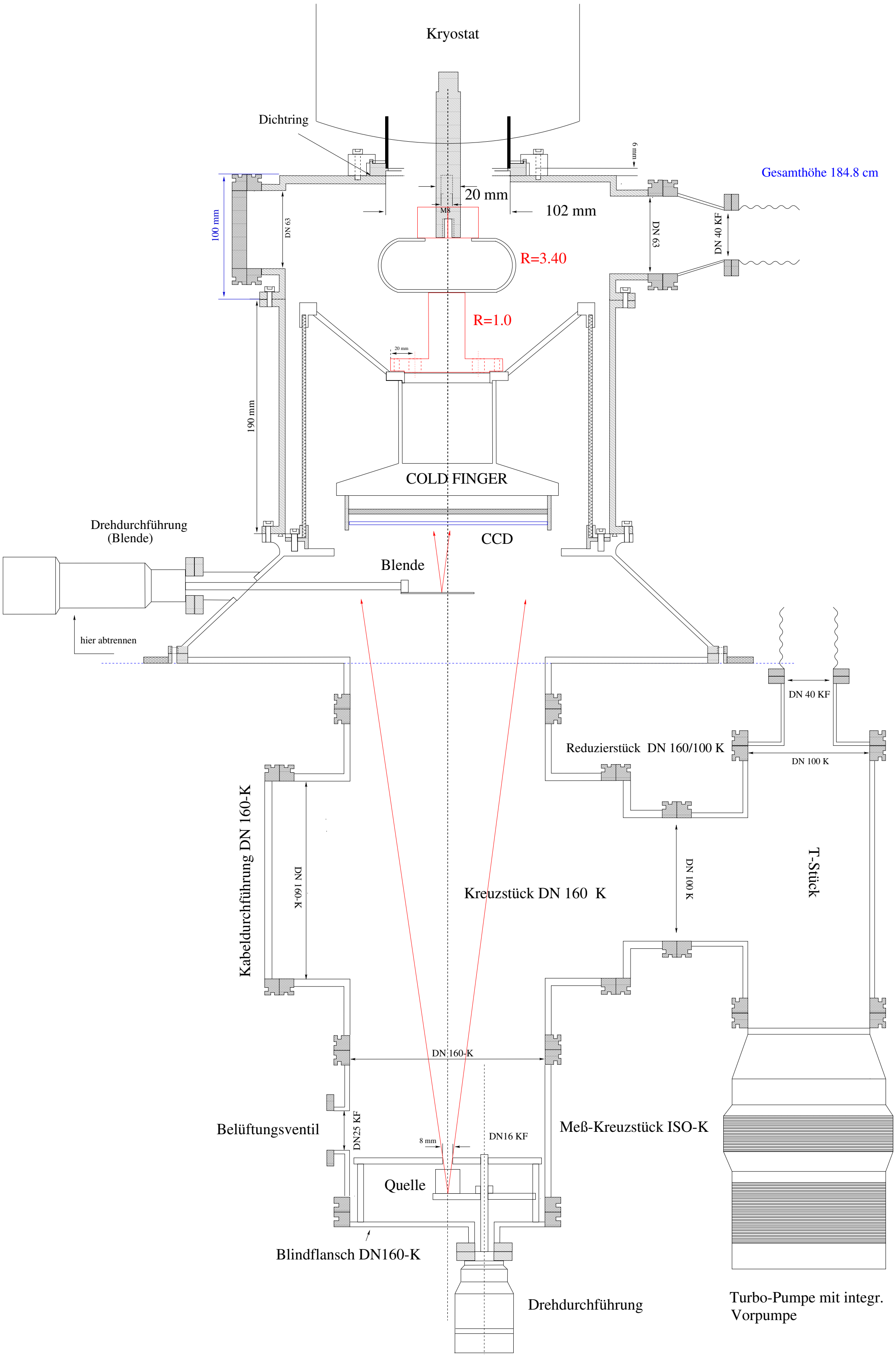



**Abb. 3.2:** Die Vakuumkammer am IAAT, mit integriertem Kamerakopf und Strahlengang.

## 3.2 Betrieb der Anlage

### 3.2.1 Das Kühlsystem und ein einfaches Thermalmodell

#### Der therm. Widerstand

Wie schon erwähnt wird das CCD mit flüssigem Stickstoff gekühlt, der bei Normaldruck eine Siedetemperatur von -195,8° C hat. An der Unterseite des Kryostaten befindet sich ein Kupfer-Stab, der die Ankopplung an das Kamera-System erlaubt. Der Kältestrom wird von hier aus über einen thermischen Widerstand auf den Kühlfinger der EPCH geleitet. Der thermische Widerstand beträgt $\mathrm{R_{th}} = 4,404 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{cm^2 \cdot K}}$. Dieser Wert entspricht dem eines thermischen Widerstands, der am MPE in München benutzt wird. Ausgehend vom Wert des Widerstands konnte die Dimensionierung des Kupfermaterials, das den Kryostaten mit dem Kaltfinger verbindet, leicht berechnet werden.

Der thermische Widerstand eines Materials mit bekannter Wärmeleitzahl $\lambda$ läßt sich nach

$$R_{th} = \frac{l}{A} \cdot \frac{1}{\lambda} \tag{3.1}$$

berechnen. Bei bekanntem Widerstand ergibt sich hieraus direkt die Querschnittsfläche A und die Länge l des verwendeten Materials. Bei Parallelschaltung zweier Widerstände folgt für den resultierenden Gesamtwiderstand, analog zur Elektrotechnik,

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{3.2}$$

$$\tag{3.3}$$

bzw. für $\mathrm{R_1} = \mathrm{R_2}$

$$R_{ges} = \frac{R}{2} \tag{3.4}$$

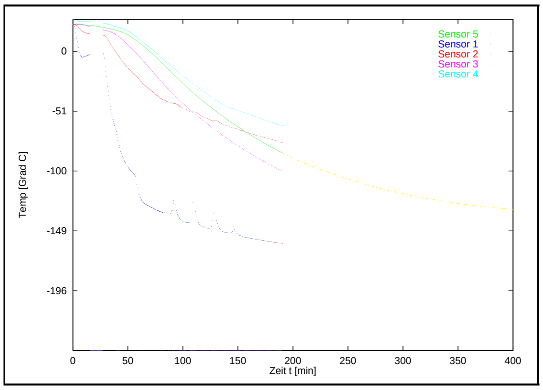
Für ein Kupferband mit der Dicke d= 0.2 cm und Breite b= 0.5 cm ergibt sich aus den oben angeführten Gleichungen eine Länge von l=7,64 cm.

Der thermische Widerstand ist durch eine mechanische Klemmung am Kupferstab des Kryostaten befestigt, was einen guten thermischen Kontakt gewährleistet. Eine weitere Aufgabe des thermischen Widerstands besteht darin, mechanische Spannungen zwischen dem Kupferstab des Kryostaten und dem Kamerakopf auszugleichen. Zu solchen Spannungen kann es auf Grund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien kommen, die im Kamerakopf verwendet werden [Hen26].

#### Das Thermalmodell

Die Abbildungen 3.3 zeigen die Temperaturverhältnisse in der Kammer beim Kühlvorgang bzw. beim Betrieb des CCDs. Zur Temperaturmessung wurden PT100-Platinwiderstände verwendet, die an verschiedenen Stellen in der Kammer angebracht waren. Die genaue Lage und die Numerierung der PT100 Widerstände kann der Abbildung A.1 im Anhang entnommen werden. Besonders auffällig sind die Spitzen, die in den Meßwerten von Sensor 1 auftreten. Sie sind die Auswirkungen des Nachfüllvorgangs des Kryostaten. Zum Zeitpunkt dieser Messung war die automatische Nachfülleinheit am Kryostat noch nicht abgeglichen. Die Folge war, daß der Stickstoffvorrat im Kryostat zu weit absinken konnte und dadurch eine korrekte Kühlung nicht mehr gewährleistet war. Dies führte zu einem periodischen Verhalten des Temperaturverlaufs, das sich aber nur auf den ersten Sensor auswirkte, der direkt am Kryostaten montiert war. Im gekühlten Zustand wurde am CCD eine minimale Temperatur von -139° C erreicht. Am Kühlfinger des Kryostaten herrscht eine Temperatur von -170° C. Dies bedeutet, daß über den Kühlfinger der EPCH ein Temperaturabfall von 31° C erfolgt. Am thermischen Widerstand findet ein Temperaturabfall von ca. 23° C statt.

Das rechte Diagramm in Abbildung 3.3 spiegelt den Temperaturverlauf direkt nach dem Einschalten des CCDs wider. Zur Simulation des CCD Betriebs wurde auf der CCD Platine eine Heizfolie aufgeklebt, die mit einer Leistung von 1 W betrieben wurde. Diese Heizleistung entspricht in etwa der Verlustleistung der Kameraplatine im normalen Betriebsmodus. Als Folge der Heizwirkung erhöht sich die Temperatur am CCD um 6.5° C.



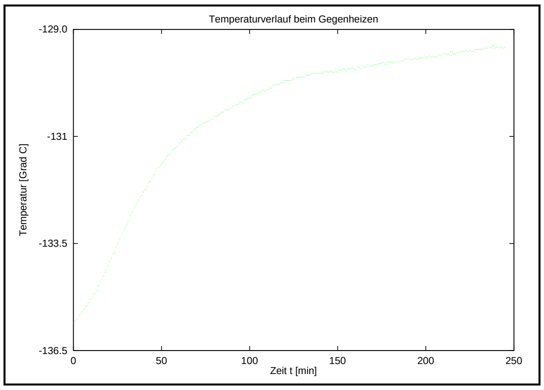




**Abb. 3.3:** Die Diagramme zeigen den Temperaturverlauf während des Kühlvorgangs (linkes Bild) und während einer Simulation des Betriebs des CCDs mit 1 W Verlustleistung (rechtes Bild).

### 3.2.2 Lecksuche

#### Unter Verwendung der Vakuummeßgeräte

Gewöhnlich sind die Vakuummeßröhren, wie Kaltkathoden-Meßröhren, auf $N_2$ kalibriert. Bei Druckmessungen in anderen Gasen ergeben sich andere Meßwerte. Diese Eigenschaft läßt sich zur Lecksuche ausnutzen, indem auf vermeintlich undichte Stellen, z.B. Alkohol gespritzt wird. Sobald die Alkoholdämpfe durch das Leck in den Rezipienten dringen und zum Meßgerät gelangen, ändert sich die Anzeige des Geräts stark. Diese Methode kann allerdings nur bei verhältnismäßig großen Lecks eingesetzt werden.

#### Mit Hilfe eines Helium-Lecksuchgeräts

Eine wesentlich bessere Methode, Lecks zu suchen, bietet die Verwendung eines Massenspektrometers, das am Rezipienten angeschlossen ist. Bevor jedoch mit dieser Methode nach Lecks gesucht werden kann, sollte die Leckrate bekannt sein. Anhand der Leckrate kann festgestellt werden, ob ein Druckanstieg vom Ausgasverhalten der verwendeten Materialien im Rezipienten oder von Undichtigkeiten herrührt. Außerdem ist eine Lecksuche mit einem Helium-Lecksucher erst bei Drücken $< 10^{-4}$ mbar möglich, weil zum Betrieb des Massenspektrometers ein Hochvakuum herrschen muß. Allerdings können mit dieser Methode Leckraten bis zu 10 $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ erkannt werden.

### 3.2.3 Sauberkeit bzw. Ausheizen der Kammer

Beim Zusammenbau und Öffnen der Anlage sollte darauf geachtet werden, daß fettfrei gearbeitet wird (Handschuhe tragen), und daß die Oberflächen der verwendeten Bauteile gut gereinigt sind. Die Reinigung der Bauteile erfolgt normalerweise mit Aceton oder Alkohol. Auch Bauteile, die längere Zeit atmosphärischer Luft ausgesetzt waren, müssen neu gereinigt werden. Dies ist wichtig, weil jede Oberfläche, die in der Luft enthaltenen Gase adsorbiert. Dies sind überwiegend die Gase $N_2$ und $O_2$. Ebenso lagert sich die Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche der Bauteile in Form eines Feuchtigkeitsfilms an. Bei Unterdruck werden diese Verunreinigungen sehr langsam wieder abgegeben und führen zu einer Kontamination des Vakuums, die bei Drucken kleiner $10^{-4}$ mbar stark an Bedeutung gewinnt.

Neben den Effekten, die durch Verunreinigungen entstehen, spielt die Zusammensetzung der verwendeten Materialien eine wichtige Rolle. In Kunststoffen, wie Kabeln oder CFK-Zylindern, sind immer bestimmte Anteile an Weichmachern oder Lösungsmitteln enthalten, die bei Unterdruck verstärkt ausgasen. Um solche Effekte so klein wie möglich zu halten, werden gewöhnlich Vakuumanlagen ausgeheizt, d.h. sie werden auf bis zu 200° C erhitzt. Dies bewirkt, daß Lösungsmittel und Wasser schneller desorbieren und aus dem Rezipienten abgepumpt werden können. Schon eine Erhöhung der Temperatur um 100° C erhöht die Desorptionsrate um eine Zehnerpotenz.

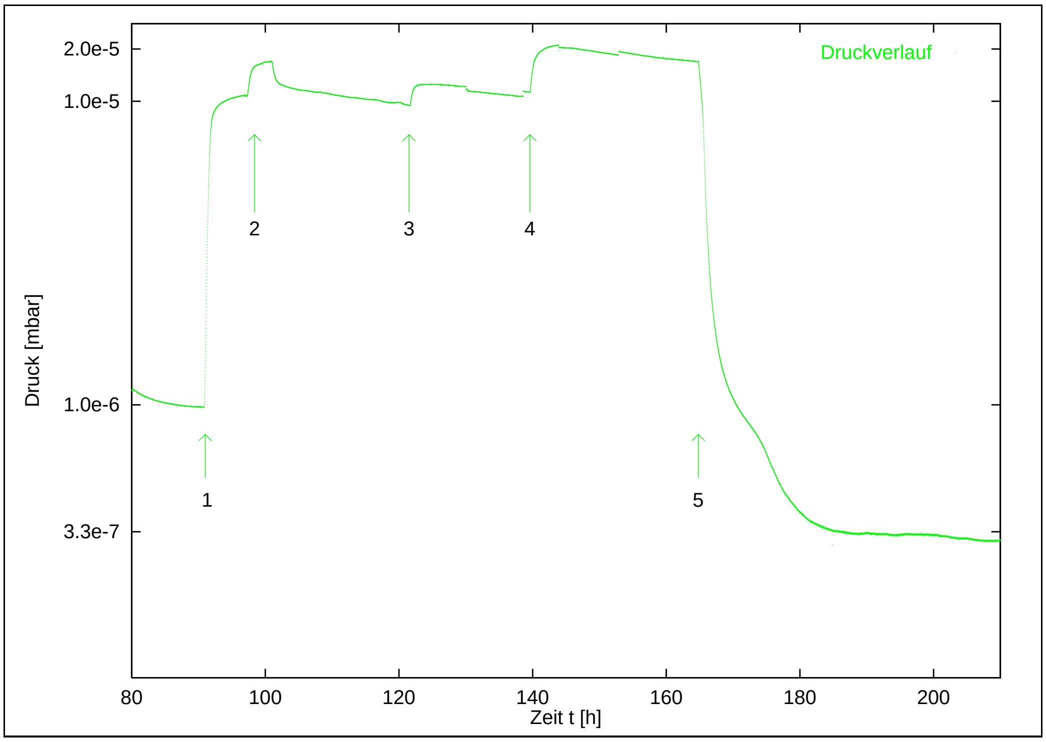



**Abb. 3.4:** Die Kurve beschreibt den Druckverlauf in der Vakuumkammer während des Ausheizvorganges. Die Pfeile markieren die Zeiten, zu denen die Temperatur geändert wurde. Ab Zeitpunkt 1 wurde auf 80° C aufgeheizt. Im weiteren Verlauf wird von 2 auf 90° C, ab 3 auf 100° C und ab 4 auf 120° C aufgeheizt. Bei 5 wurde die Heizung wieder ausgeschaltet.

Die Abbildung 3.4 zeigt den Druckverlauf in der Anlage während sie ausgeheizt wurde. Der Ausheizvorgang verlief in mehreren Stufen. Zuerst wurde auf 80° C aufgeheizt, was aus den oben beschriebenen Gründen einen deutlichen Anstieg des Drucks in der Kammer zur Folge hatte. Anschließend wurde in drei weiteren Stufen auf 90° C, 100° C bzw. 120° C weiter erhitzt. Vergleicht man den Druck vor dem Ausheizvorgang, $1.0 \cdot 10^{-6}$ mbar, mit dem nach dem Ausheizen, $3.3 \cdot 10^{-7}$ mbar, dann ist eine Verbesserung von fast einer Zehnerpotenz feststellbar. Nachdem anschließend über 1 Woche weiter gepumpt wurde, fiel der Druck auf $3.1 \cdot 10^{-8}$ mbar ab. Dies bedeutet,daß die Anlage, falls sie über mehrere Tage hinweg offen stand, anschließend ausgeheizt werden sollte. Die Sauberkeit der Kammer wird sich natürlich auch positiv auf längerfristige Verunreinigung des CCDs auswirken.

### 3.2.4 Belüften

Um die unter 3.2.3 genannten Adsorptionseffekte und Verunreinigungen möglichst gering zu halten, darf der Rezipient auch nur mit trockenem $N_2$ belüftet werden. Zusätzlich ist darauf zu achten, daß die Anlage vor dem Belüften auf Umgebungstemperatur aufgeheizt wird, da sonst durch Kondensation von Luftfeuchtigkeit bzw. Eisbildung die Kammer wie auch das CCD verunreinigt wird. Außerdem muß natürlich darauf geachtet werden, daß kein Überdruck in der Anlage erzeugt wird. Um dies zu verhindern wird ein Flansch gelockert, der sich beim Belüften öffnet.

### 3.2.5 Betriebsparameter

In der nachfolgenden Tabelle sind die erzielten Betriebsparameter zusammengefaßt. Sie sollen einen kurzen Überblick über die Leistungsfähigkeit der Vakuumanlage geben:

| | |
|---|---|
| Temperatur am CCD (nicht in Betrieb) | -139.5° C |
| Temperatur am Kühlfinger | -153° C |
| Temperatur CCD-Platine | -114° C* |
| Temperatur am CCD (in Betrieb mit 1 W Verlustleitung) | -133° C |
| Temperatur am Kühlfinger | -149.0° C |
| Temperatur CCD-Platine | -61.1° C* |
| Volumen der Kammer ohne Kamerakopf | 50 l |
| Druck in der Kammer (ungekühlt) | $4.3 \cdot 10^{-7}$ mbar |
| Druck in der Kammer (gekühlt) | $3.1 \cdot 10^{-8}$ mbar |
| Heizleistung der Heizbänder | 1.2 KW |
| $N_2$ Verbrauch | ca. 0.35 l/h |
| Höhe | 194 cm |
| Breite | 70.5 cm |
| Länge | 120 cm |

**Tab. 3.1:** Betriebsparameter der Vakuumkammer. * Der verhältnismäßig starke Temperaturanstieg der CCD-Platine erklärt sich dadurch, daß der Temperatursensor zwischen zwei Heizfolien auf der CCD-Platine angebracht war. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Kameraplatine unterstützt diesen Effekt.

# Kapitel 4

# Das EPIC pn-CCD

Der pn-CCD-Detektor (siehe Abbildung 4.1) hat eine effektive Fläche von 36 $cm^2$ und besteht aus 12 Einzel-CCDs, die monolitisch auf einem Silizium-Waver integriert sind. Um im Zentrum des CCDs eine möglichst hohe Redundanz zu gewährleisten, ist der Detektor zusätzlich in vier Quadranten unterteilt. Jeder dieser Quadranten besitzt seine eigene Aus-

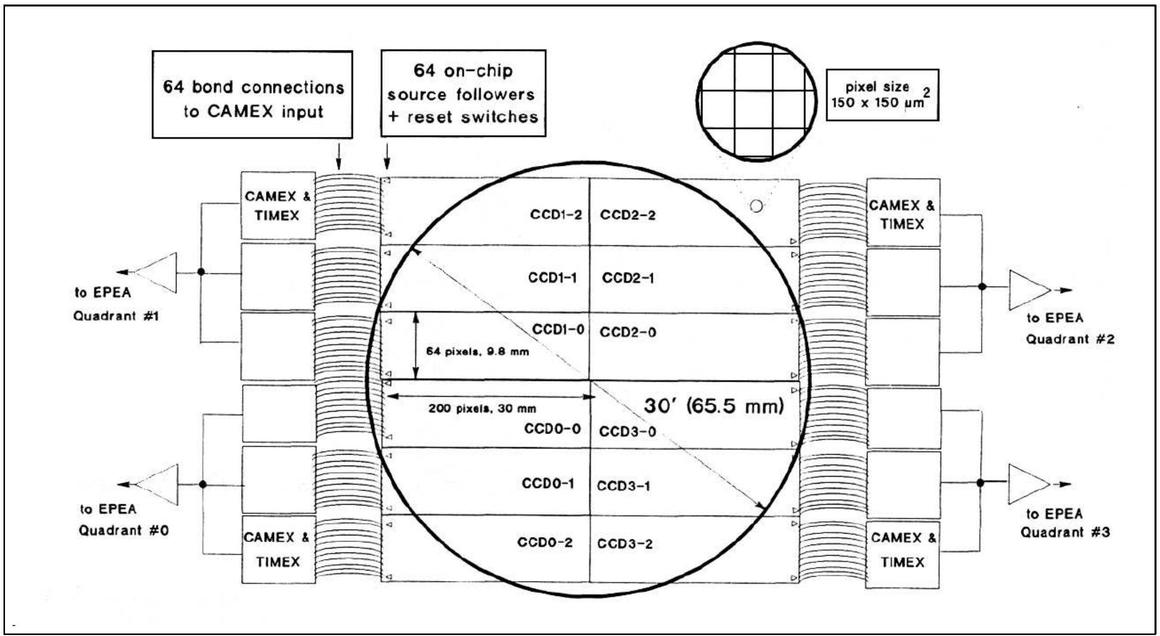



**Abb. 4.1:** Der pn-CCD Array für die Fokalebene von EPIC.

leseelektronik (EPEA). Die einzelnen CCDs werden über 64 parallele Kanäle ausgelesen. Die Ausgangssignale müssen noch auf dem Waver mit einen JFET-Vorverstärker verstärkt werden, um kapazitive Effekte durch die Bonddrähte zu verringern. Die 64 Signale werden anschließend über Bonddrähte parallel einem CAMEX64B (siehe 4.1.3) zugeführt, der die Signale weiter verstärkt, rauschfiltert und dann multiplext, um sie seriell auslesen zu können. Die einzelnen Kanäle bestehen aus 200 Pixel, mit einer Größe von 150 $\mu$m x 150 $\mu$m.

In den nun folgenden Kapiteln sollen das pn-CCD und seine beiden Auslesechips vorgestellt werden.

## 4.1 Aufbau und Funktion des CCD

### 4.1.1 Der pn-Übergang

Das Funktionsprinzip des pn-CCDs beruht auf den Eigenschaften eines pn-Übergangs. Aus diesem Grund soll zunächst ein einfacher pn-Übergang näher erklärt werden, bevor auf das pn-CCD eingegangen wird.

#### n-Halbleiter

Halbleiter, in diesem Fall Silizium, sind nur sehr schlechte elektrische Leiter. Ihre Leitfähigkeit kann aber künstlich verändert werden, indem die Anzahl der Elektronen bzw. Löcher durch Einbau von Fremdatomen ins Kristallgitter erhöht wird. Dieser Vorgang wird Dotieren genannt. Wird etwa jedes $10^6$-te Silizium-Atom durch ein Element der fünften Hauptgruppe des Periodensystems, z.B. durch Phosphor, ersetzt, kann das überschüssige Elektron des Phosphors keine kovalente Bindung eingehen. Dieses Elektron steht dem Leitungsband als überschüssiger Ladungsträger zur Verfügung. In Abbildung 4.2 sind diese Elektronen im n-Gebiet durch $\bullet$ gekennzeichnet und die zurückbleibenden positiven Atomrümpfe durch $\ominus$. Solche Elemente werden als Donatoren bezeichnet. Die Leitfähigkeit des Siliziums wird jetzt von den zusätzlichen Elektronen der Donatoren bestimmt. Es entsteht ein n-Halbleiter.

#### p-Halbleiter

Werden dagegen Si-Atome durch 3 wertige Elemente der Gruppe III (z.B. Bor) ersetzt, so kann das Bor-Atom ein Elektron unter Energieabgabe aus dem Leitungsband des Si einfangen. Zurück bleibt ein Loch im Valenzband, das jetzt zur Stromleitung beitragen kann. Solche Fremdatome wirken als Akzeptoren für Elektronen. Hierbei handelt es sich um eine p-Dotierung. In Abbildung 4.2 sind die Akzeptoren im p-Gebiet mit $\bullet$ und die zurückbleibenden Löcher mit $\circ$ gekennzeichnet.

#### pn-Übergang

Werden ein p-Halbleiter und ein n-Halbleiter zusammengebracht, dann entsteht eine typische pn-Übergangszone. In unmittelbarer Nähe der Trennschicht (entspricht der Übergangszone in Abbildung 4.2) werden die frei beweglichen Elektronen und Löcher wegen der hohen Konzentrationsunterschiede zu Diffusionsströmen gezwungen und erhalten dadurch eine andere Verteilung. Elektronen des n-Gebiets diffundieren in das p-Gebiet und füllen dort die Löcher auf. Dadurch wird das p-Gebiet in der Nähe der Trennschicht negativ aufgeladen. Die im n-Gebiet zurückbleibenden Löcher erzeugen dort eine positve Raumladung. Es entsteht ein vom n- ins p-Gebiet gerichtetes elektrisches Feld. Im stationären Fall bildet sich ein Gleichgewicht zwischen dem entstandenen Feldstrom $\vec{j}_F$ und dem Diffusionsstrom $\vec{j}_D$, also

$$\vec{j}_D = \vec{j}_F \tag{4.1}$$

$$kT\mu_n \, grad \, n = \sigma\vec{E} \tag{4.2}$$

wobei $\mu_n$ die Beweglichkeit der Ladungsträger beschreibt und n der Ladungsträgerkonzentration entspricht.

Die Umgebung des pn-Übergangs wird als Verarmungszone oder Depletionszone bezeichnet, weil hier keine freien Ladungsträger mehr vorhanden sind. Im p-Gebiet sind die

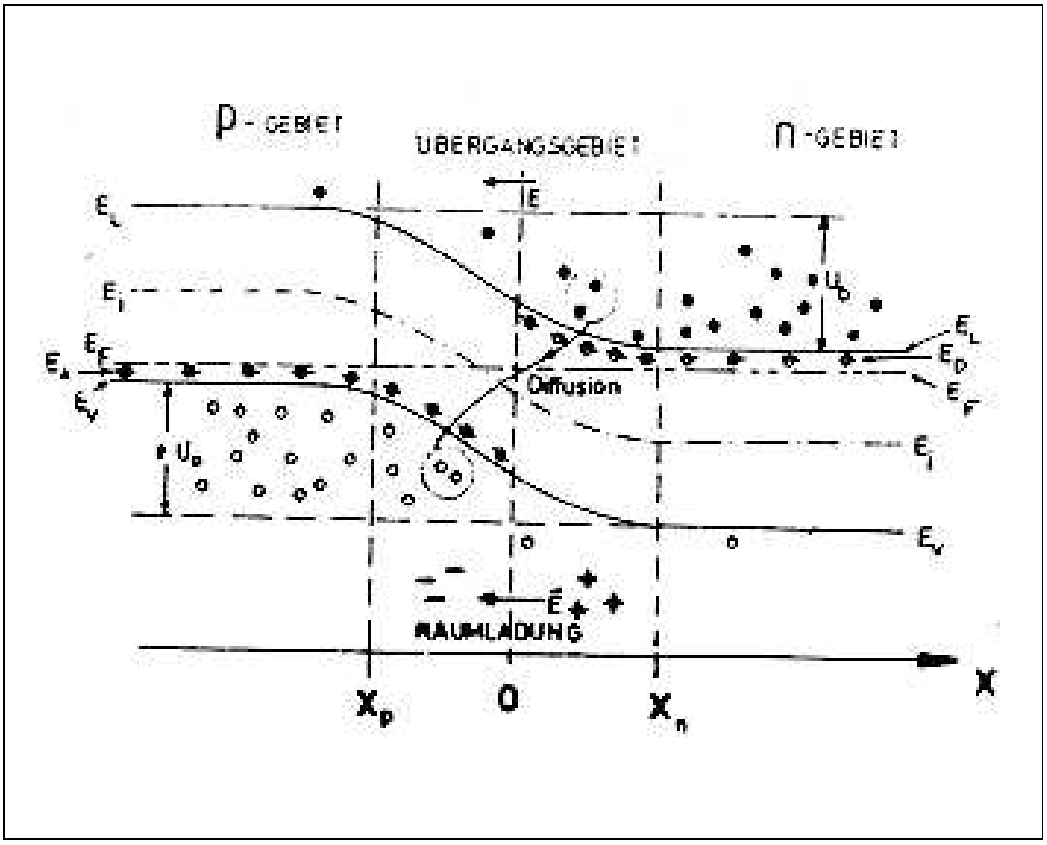



**Abb. 4.2:** Schematische Darstellung eines p-n-Übergangs. • entsprechen den negativen und ∘ den positiven Ladungsträgern. In der Darstellung werden folgende Bezeichnungen verwendet: $E_v$: Energie des Valenzbandes, $E_L$: Energie des Leitungsbandes, $E_F$: Fermi-Energie, $E_D$: Energie der Donatoren-Niveaus und $E_A$: Energie der Akzeptoren-Niveaus.

Löcher durch Elektronen besetzt und im n-Gebiet fehlen die ins p-Gebiet hinübergewanderten Elektronen.

Der Potentialverlauf entlang eines solchen pn-Übergangs ergibt sich einfach aus der Poisson-Gleichung

$$\nabla^2 \phi = \Delta \phi = -\frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \rho(x) \tag{4.3}$$

mit der Dielektrizitätskonstanten $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$. $\rho(x)$ beschreibt die Ladungsverteilung in Abhängigkeit von der x Koordinate. Sie setzt sich aus den Konzentrationen der Löcher, der Elektronen, der ionisierten Donatoren und Akzeptoren folgendermaßen zusammen

$$\rho(x) = -e(n(x) - p(x) + n_A(x) - n_D(x)) \tag{4.4}$$

mit n(x)=Elektronendichte, p(x) = Löcherdichte, $n_A(x)$ = Akzeptorendichte und $n_D(x)$ = Donatorendichte. Durch Integration der Poisson-Gleichung 4.3 mit der Ladungsverteilung aus 4.4 läßt sich der Potentialverlauf entlang eines pn-Übergangs berechnen. Die Dichten der Ladungsträger beziehungsweise der ionisierten Donatoren und Akzeptoren können mit Hilfe der Fermiverteilung angegeben werden.

### Photoeffekt im pn-Übergang

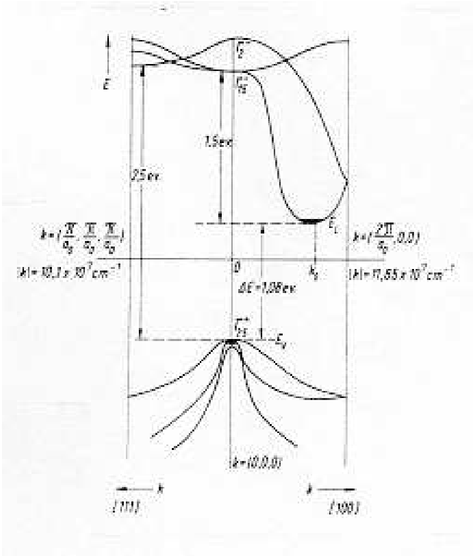



**Abb. 4.3:** Die Energie der Elektronen als Funktion des Ausbreitungsvektors $\vec{K}$ für die [100]- und [111]-Richtung im Silizium-Kristall.

Eine wichtige Anwendung des pn-Übergangs bei Halbleitern ist die Photodiode. Hierbei handelt es sich um einen in Sperrichtung gepolten pn-Übergang. Durch Absorption elektromagnetischer Strahlung werden im Depletionsgebiet Elektron-Loch-Paare erzeugt. Das Gleichgewicht zwischen Driftstrom und Diffussionsstrom wird dadurch gestört, es fließt kurzzeitig ein Strom. Strahlungsabsorption ist nur möglich, wenn die Energie $h\nu$ der einfallenden Photonen größer ist als der Bandabstand des bestrahlten Materials. Bei Silizium beträgt der Bandabstand $\Delta \mathrm{E} = 1.08\,\mathrm{eV}$. Allerdings konkurriert die Elektron-Loch-Paar Erzeugung mit einem weiteren Effekt, der Erzeugung von Phononen (Gitterschwingungen). Dies führt dazu, daß zusätzlich zu den 1.08 eV zur Überwindung des Bandabstands Energie aufgebracht werden, die in Phononenschwingungen umgesetzt wird. Bei Silizium heißt dies, daß im Mittel ein Photon die Energie $\Delta \mathrm{E}_\gamma > 3.68\,\mathrm{eV}$ (bei 300 K) besitzen muß, damit ein Elektron-Lochpaar erzeugt werden kann.

### Die Seitwärtsdepletion

Da die Absorptionslänge für Photonen mit zunehmender Energie ansteigt und damit die Absorptionswahrscheinlichkeit bei gleicher Dicke des absorbierenden Materials abnimmt, müssen Detektoren für höherenergetische Photonen ein tieferes Absorptionsgebiet, also Depletionsgebiet, besitzen.

Durch das Verfahren der Seitwärtsdepletion wird das Depletionsgebiet über die ganze Breite des n-Silizium ausgedehnt. Die Depletionszone erreicht bei den pn-CCDs so eine Tiefe von 280 $\mu$m. Dies hat zur Folge, daß auch hochenergetische Photonen nachgewiesen werden können.

Realisiert wird die Seitwärtsdepletion durch einen pnp-Übergang. Auf der Ober- und Unterseite des n-Siliziums wird eine p-Silizium Schicht aufgebracht. Dadurch entstehen vorerst zwei Depletionszonen zwischen den p- und n-Gebieten. Wird zwischen den p- und n-Schichten eine Sperrspannung angelegt, dann breiten sich die Depletionszonen aus, bis sie bei genügend hoher Sperrspannung in der Mitte des n-Gebietes aufeinander treffen. In diesem Fall spricht man von einem voll depletierten n-Halbleiter. Liegen die jeweils gegenüberliegenden p-Halbleiter auf gleichem Potential, dann bildet sich das Potentialminimum in der Mitte des n-Halbleiters. Durch unterschiedliche Potentiale an den p-Halbleitern, kann die Lage des Potentialminimums verschoben werden. Für das pn-CCD ist es notwendig, ein Potentialminimum direkt unter dem oberen p-Halbleiter zu erreichen, damit sich dort die durch Photoneneinfall generierte Elektronen sammeln können.

## 4.1.2 Die Pixelstruktur und der Ladungstransfer

Bisher wurden nur sehr einfache Halbleiterdetektoren wie die Photodiode besprochen, die keine Ortsinformation über den Wechselwirkungsbereich zwischen Photon und Halblei-

**Abb. 4.4:** Das Prinzip der Seitwärtsdepletion in einem p-n-p-Übergang. Links: Ausbreitung der Depletionszone, rechts: Potentialverlauf.

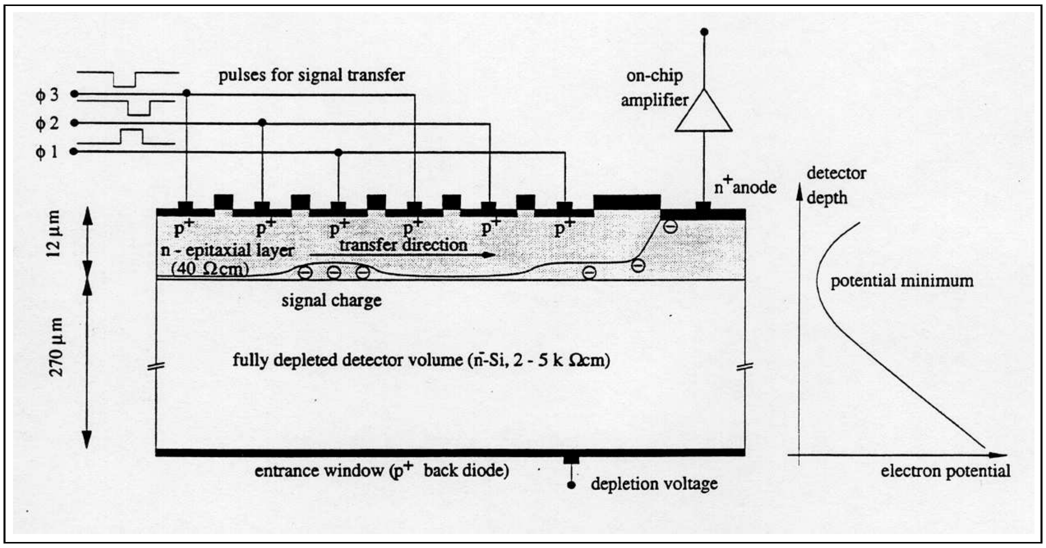



**Abb. 4.5:** Die Pixelstruktur und der Landungstransfer im pn-CCD.

ter liefern können. Den Vorteil der Ortsauflösung, der für Detektoren in der Röntgen-Astronomie von entscheidender Wichtigkeit ist, bieten die voll depletierbaren pn-CCDs.

Ausgangspunkt für die Konstruktion eines pn-CCDs ist der oben beschriebene pnp-Übergang. Beim pn-CCD wird nun eine p-Schicht in Streifen aufgeteilt (Vorderseite), die zweite p-Schicht wird nicht unterteilt. Diese homogen beschichtete Seite des CCDs wird als Rückseite bezeichnet. Die Rückseite wird gegenüber der Vorderseite des CCDs stark negativ vorgespannt. Dadurch wird erreicht, daß das Potentialminimum dicht unter der Vorderseite zu liegen kommt. Die von den Photonen generierte Ladungen sammeln sich hier. Die einzelnen Pixel des Detektors werden aus jeweils drei p-Streifen gebildet. Mit Hilfe dieser p-Streifen lassen sich Potentialmulden generieren, in denen sich die Elektronen sammeln können. Durch anlegen unterschiedlicher Spannungen (die sogenannten Phi-Pulse), die abwechselnd an drei aufeinanderfolgende p-Streifen gelegt werden, lassen sich diese Potentialminima erzeugen. Zum Transport der Ladungen zu den Ausleseanoden werden die Spannungen zeitlich variiert. Dadurch wandern die Potentialminima senkrecht zu den p-Streifen über das CCD und schieben die Ladungen zur Ausleseanode.

Bisher wurde nur erklärt, wie eine Streifenstruktur auf dem Halbleiter erzeugt wird. Um aber einzelne Pixel zu bilden, müssen zusätzlich Sperrschichten zwischen den Transportkanälen in der zweiten Dimension angebracht werden, die sogenannten Channelstops. Sie werden durch Ionenimplantation erzeugt. Diese Implantationsgebiete erzeugen Raumladungszonen, die für die Elektronen Potentialbarrieren darstellen. Die Elektronen werden also in einer von allen Seiten begrenzten Potentialmulde bewegt.

### 4.1.3 Integrierte Verstärkerelektronik

#### CAMEX

Der CAMEX64[1] ist ein hochintegrierter Verstärkerchip, der vom Werner-Heisenberg-Institut für Physik, München in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Mikroelektrische Schaltungen, Duisburg entwickelt wurde. Es handelt sich beim CAMEX64 um einen anwenderspezifischen integrierten Schaltkreis (ASIC [2]). Der CAMEX führt sowohl eine analoge wie auch eine digitale Signalverarbeitung durch.

Insgesamt sind 12 CAMEX ICs auf der CCD-Platine montiert (siehe Abbildung 4.6). Die Verbindung zum CCD-Array wird über Bonddrähte hergestellt, die durch eine Öffnung auf der CCD-Platine geführt werden. Diese Bonddrähte stellen die Verbindung mit den 64 Ausgangskanälen des Einzel-CCDs her. Direkt neben den CAMEX-ICs befinden sich die zugehörigen TIMEX-Chips. Sie sind auch über Bonddrähte mit dem CAMEX verbunden. Die Ausgangssignale der CAMEX werden über Flex-Leads aus dem Kamerakopf vakuumdicht herausgeführt.

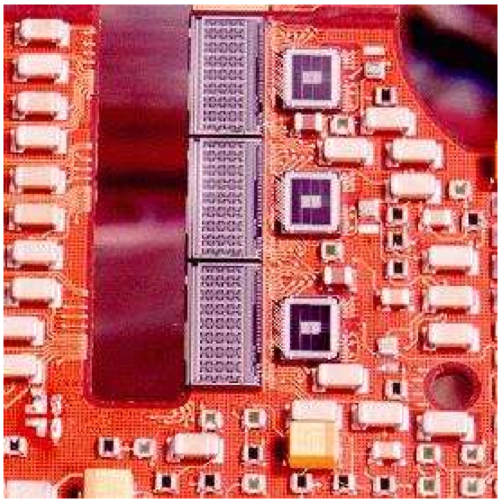


**Abb. 4.6:** Die CAMEX und TIMEX ICs eines Quadranten. Die linke Öffnung auf der CCD-Platine dient zur Durchführung der Bonddräte zum CCD.

Der CAMEX verstärkt die an den 64 Ausgangskanälen des CCDs anliegenden Signale zuerst analog, führt eine Rauschfilterung durch und gibt die Signale dann mit einer digitalen Dekodierlogik (Multiplexer) an die EPEA weiter. Die Bearbeitung der Signale der 64 Einzelkanäle des

[1] **C**MOS-**A**mplifier-and-**M**ultipl**ex**er-Chip; ursp. Bez.: "**C**MOS **A**nalog **M**ultipl**ex**ing readout chip"
[2] ASIC: **A**pplication **S**pecific **I**ntegrated **C**ircuit

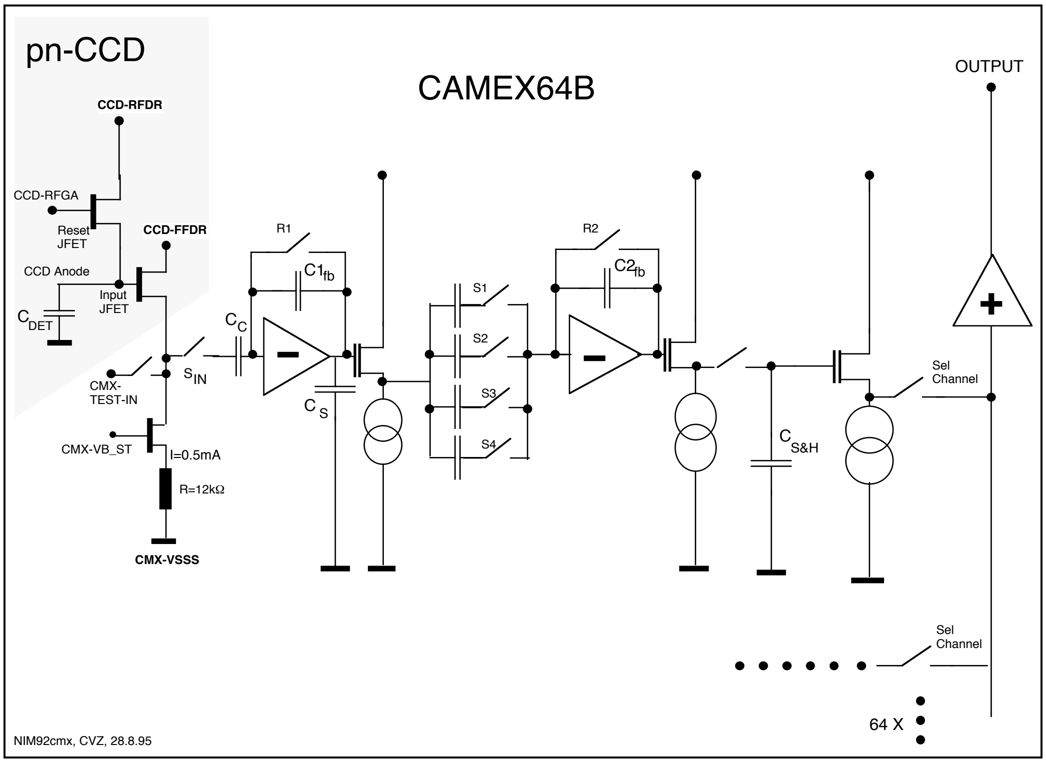



**Abb. 4.7:** Das Blockschaltbild des CAMEX.

CCDs erfolgt dabei parallel.

Bevor die Ladungen, die auf der Anode des CCDs gesammelt wurden, dem CAMEX zugeführt werden können, müssen sie noch auf dem Silizium-Waver vorverstärkt werden. Die Ursache dafür liegt an den Eigenkapazitäten der Bonddrähte, die die geringen Spannungen, die an der Anode anliegen, einbrechen lassen würden. Diese Vorverstärkung übernimmt ein JFET-Sourcefolger, der das CCD-Anodensignal hochohmig an den entsprechenden CAMEX-Kanal weiterleitet.

Das so aufbereitete Anoden-Signal wird jetzt dem CAMEX zugeführt, der dann folgende Schritte zur Verarbeitung der Signale durchführt:

1. Das Signal wird vorverstärkt.
2. Eine Offsetkorrektur wird durchgeführt (Baseline-Sampling).
3. Die eigentliche Signalverarbeitung und Rauschfilterung mit einer Vierfachabtastung folgt nach dem Baseline-Sampling (Signal-Sampling).
4. Das korrigierte Signal wird nachverstärkt und auf die Ausgangsstufe (S+H [3]) gegeben.
5. Zum seriellen Auslesen werden die 64 Signale von einem Multiplexer auf den Eingang eines Analog Digital Wandlers (ADC) in der EPEA gegeben.

## TIMEX

Der TIMEX ist die digitale Kontrolleinheit des CAMEX, die die zeitliche Steuerung der Schalter im CAMEX übernimmt. Wegen seiner rein digitalen Aufgaben wurde der TIMEX als externer ASIC realisiert und nicht in den CAMEX integriert.

Seine Aufgabe besteht darin, aus den drei Signalen TIMING, INIT und CLOCK-D-IN die 14 notwendigen Steuerpulse für den CAMEX zu generieren. Die 14 Pulse lassen sich in 8 Schaltersteuer-Pulse und 6 Kodierlogik-Pulse unterteilen. Die Kodier-Pulse werden aus den 64 Pulsen des CLOCK-D-IN Signals erzeugt. Wie sein Name schon sagt, übernimmt der INIT-Puls die Initialisierung des TIMEX. Die Pulse für die Schaltersteuerung, insgesamt 6, werden aus dem TIMING-Signal erzeugt.

Durch die Zweiteilung der Pulse in Steuer- und Kodierpulse ergibt sich ein großer Vorteil des CAMEX: Solange die Zeile n-1 ausgelesen wird, kann schon die n-te Zeile konvertiert werden [Mar93].

## 4.2 Eigenschaften des CCD-Signals

### 4.2.1 Der Offset

Wie die meisten Detektoren liefert das pn-CCD auch ein Ausgangssignal, ohne daß es mit einer Eingangsgröße behaftet ist, d.h. der Detektor liefert ein Ausgangssignal ohne Photonenbestrahlung. Dieses Offset genannte Signal kommt bei jeder Messung als additive Konstante hinzu und muß von den eigentlichen Röntgensignalen wieder abgezogen werden. Zusätzlich erzeugt die Verarbeitungselektronik EPEA noch weitere Offsets, die später bei der Verarbeitung der Meßwerten, die die EPEA verlassen, berücksichtigt werden müssen.

Der Gesamtoffset, des Signals setzt sich also aus mehreren Einzelanteilen zusammen, die folgenden Ursprung haben:

1. Die einzelnen CCD-Pixel
2. Die 64 First-FETs auf dem CCD
3. Der CAMEX
4. Der Operationsverstärker vor der EPEA
5. Die Common Mode-Karte

Den Hauptanteil am Gesamtoffset tragen die 64 Verstärkerstufen des CAMEX bei. Einen sehr geringen Anteil dagegen liefern die einzelnen Pixel.

### 4.2.2 Das Rauschen

Ähnlich wie die Offsetbeiträge der einzelnen Teile der MAXI-Kamera, setzen sich auch die Rauschanteile aus den Beiträgen, die die einzelnen Komponenten des CCDs und der EPEA generieren, zusammen. Dies sind im Wesentlichen die Anteile der folgenden Komponenten:

1. Das CCD-Pixel

   Ursache der Rauschbeiträge der einzelnen Pixel sind die Leck- und Störstellen im CCD die zur Erzeugung sogenannter Rauschladungen beitragen. Quantitativ läßt sich dieser Anteil mit Hilfe des Fanofaktors folgendermaßen formulieren:

   $$\sigma^2_{fano} = F \cdot < N_{gen} >$$

   F hat für Silizium den Wert von ca. 0.12. Mit einer typischen Photonenenergie von 5 keV hat $\sigma_{fano}$ einen Betrag von etwa 19 eV.

2. Der Anodenleckstrom der Ausleseanode

3. Der First-FET
4. Der CAMEX
5. Der Operationsverstärker und der ADC

Die Summe der Beiträge von Dunkelstromrauschen der Pixel und elektronischem Rauschen ergibt die Gesamtrauschbreite $\sigma_{noise}$ an. Sie setzt sich aus den oben genannten Anteilen wie folgt zusammen

$$\sigma_{Noise} = \sqrt{\sigma_{fano}^2 + \sigma_{ADC}^2 + \sigma_{CAMEX}^2} \approx 23.4\,\mathrm{eV} \tag{4.5}$$

### 4.2.3 Der Common-Mode

Die Versorgungsspannung $V_{ss}$ der First-FET Sources ist zeitlich leicht variabel, dadurch kommt es zu einer weiteren charakteristischen Eigenschaft des CCD-Signals. Die Pixel einer Zeile werden beim Verlassen des CAMEX um einen zufälligen und konstanten Wert verschoben. Dieser Effekt wirkt sich immer auf eine ganze Zeile aus, da jeweils die Signale einer ganze Zeile gleichzeitig von den First-FETs verarbeitet werden. Dieser Effekt wird als "Common Mode" bezeichnet.

Berücksichtigt man alle oben aufgeführten Rauschanteile, dann ergibt sich das Gesamtrauschen eines nicht korrigierten Signals wie folgt:

$$\sigma_{Gesamt} = \sqrt{\sigma_{Noise}^2 + \sigma_{CMM}^2 + \sigma_{Offset}^2} \tag{4.6}$$

$$= \sqrt{\sigma_{fano}^2 + \sigma_{ADC}^2 + \sigma_{CAMEX}^2 + \sigma_{CMM}^2 + \sigma_{Offset}^2} \approx 210\,\mathrm{eV} \tag{4.7}$$

Für die Linienverbreiterung durch den individuellen Offset wurde ein mittlerer Wert von $\sigma_{Offset} = 115$ eV verwendet.

### 4.2.4 Partial Events

Auf Grund des physikalischen Aufbaus des CCDs (4.5) besteht die Möglichkeit, daß Photonen mit niedriger Energie in der Totschicht oder dem Bereich der Bor-Implantation wechselwirken. Solche Effekte treten besonders bei Gammaenergien von 100 eV $< E_\gamma <$ 500 eV auf. Ein Photon dieser Energie kann zwar die Totschicht durchdringen, wird aber am wahrscheinlichsten in dem Bereich der Borimplantation absorbiert. Dies bedeutet, daß ein Teil der generierten Ladungswolke im p-Halbleiter rekombinieren kann und anschließend nicht mehr zur Pixelebene gelangt. Solche Ereignisse werden als Partial Events bezeichnet, deren Energie stark von der Absorptionstiefe abhängt. Physikalisch beschreiben läßt sich dieser Sachverhalt anhand der Charge Collection Efficiency (CCE). Wenn N die Zahl der im Pixel deponierten Elektronen, $N_{gen}$ die Zahl der erzeugten Elektronen und t die Dicke der Totschicht gegeben ist, dann folgt für die CCE in Abhängigkeit von der Absorptionstiefe

$$N(z) = N_{gen} \cdot CCE(z) \tag{4.8}$$

$$CCE(z) = 1 - e^{-\frac{z-t}{\tau}} \quad \text{für} \quad z > t \tag{4.9}$$

### 4.2.5 Pile Ups

Bei pointierten Beobachtungen sehr heller Objekte besteht die Möglichkeit, daß während eines Integrationszyklus mehrere Photonen in das gleiche Pixel treffen. Diese Ereignisse werden als sogenannte Pile-Up-Ereignisse bezeichnet. Bei monochromatischer Bestrahlung hat dies zur Folge, daß die doppelte, dreifache oder entsprechende vielfache Linienenergie im Pixel deponiert wird. Im Spektrum treten dadurch neben der Linie der Grundenergie zusätzlich noch Linien mit der doppelten oder dreifachen Energie der Grundenergie auf. Diese Situation bereitet vorallem bei kontinuierlichen Spektren Schwierigkeiten. Hier ist die Trennung der Pile-Ups vom Spektrum nicht mehr trivial und muß durch Faltung der Spektren mit Modellspektren geschehen.

Mathematisch läßt sich die Wahrscheinlichkeit P(n) für den n-ten Pile-Up näherungsweise durch

$$P(n) \approx \frac{1}{e \cdot n!} \tag{4.10}$$

beschreiben.

### 4.2.6 Split Events

Während sich die erzeugte Ladungswolke im Driftfeld in Richtung Pixelebene bewegt, breitet sie sich aufgrund von Diffusion und Coulombabstoßung immer weiter aus. Trifft diese ausgedehnte Ladungwolke auf der CCD-Vorderseite auf den Rand eines oder mehrerer Pixel, dann entsteht ein sogenanntes Split Event. Die erzeugten Ladungen befinden sich dabei im Einzugsgebiet der Potentialmulden mehrerer Pixel, so daß sich die Ladungen über mehrere Pixel verteilen können.

Die statistische Verteilung der Split Events auf zwei, drei oder vier Pixel hängt nur vom Radius der Ladungswolke und von der Pixelfläche ab. Die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Splits ergeben sich direkt aus den Flächenverhältnissen der jeweils für die Splits empfindlichen Flächen.

Die energetische Verteilung der Splits zeigt die typische "Badewannen"-Form (siehe auch [Sch95]).

| | |
|---|---|
| Single Events | 75.1 % |
| 2er Split Events | 23.1 % |
| 3er Split Events | 0.4 % |
| 4er Split Events | 1.4 % |

**Tab. 4.1:** Wahrscheinlichkeit für Split Ereignisse.

### 4.2.7 Die Verstärkung (Gain)

Der CAMEX verarbeitet die ankommenden Signale parallel in seinen 64 Kanälen. Jeder der Kanäle besitzt seine eigenen Verstärkungseigenschaften, die bis auf ein Prozent voneinander abweichen können. Zusätzlich besitzt das CCD 64 individuelle JFET Vorverstärker die ebenfalls unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

Diese Differenzen in der Verstärkung der Signale in unterschiedlichen Spalten führt zu einem spaltenabhängigen Effekt und muß nachträglich korrigiert werden. Ein Teil der Korrektur wird schon durch die Offsetkorrektur der EPEA vorgenommen, worauf im Kapitel 7 noch näher eingegangen wird.

### 4.2.8 CTE

Die Charge Transfer Efficiency (CTE) beschreibt die Tatsache, daß beim Transfer der Ladungen über die Zeilen hinweg aus verschiedenen Gründen Ladungen verloren gehen.

Die CTE wird für einen Transfervorgang der Ladung Q von der Zeile i+1 nach Zeile i definiert durch

$$CTE = \frac{Q_{Zeile\ i+1}}{Q_{Zeile\ i}} \tag{4.11}$$

Dies hat zur Folge, daß von einer in der Zeile i erzeugten ursprünglichen Ladung, bei mehrfachem Schieben an der Ausleseanode noch die Ladung

$$Q_{Anode} = Q_i \cdot CTE^i \tag{4.12}$$

ankommt.

Die Ursachen für den Transportverlust sind in den Eigenschaften des Halbleiters zu suchen. Zum einen spielen Faktoren wie die Transferzeit, die Registerspannungen und die Stop-Potentiale eine Rolle und zum anderen die Eigenschaft von Störstellen die als sogenannte Trapping Centers wirken können [Bih96].

# Kapitel 5

# Die Ausleseelektronik EPEA

Die am IAAT entwickelte Elektronikeinheit EPEA verarbeitet die analogen Signale des CCDs, die sie von der EPCH erhält. Diese analogen Daten werden mit einem 12 Bit ADC digitalisiert. Den digitalen Energiedaten werden pixelweise Zeilen-, Spalten- und Chipinformationen hinzugefügt und zusammen mit Zeitinformationen über eine High-Bit-Rate (HBR) Schnittstelle an die EPDH weitergeleitet, von wo aus die Daten in den Datenstrom des Satelliten eingespeist werden. Von der EPCE aus wird die EPEA über ein Low-Bit-Rate Interface (LBR) gesteuert. Ebenfalls über diese Schnittstelle sendet die EPEA Housekeeping Daten an die EPCE.

Die EPEA-Box besteht aus mehreren einzelnen Steckkarten, die von einem Aluminium-Gehäuse fixiert werden (siehe Abbildung 5.1). Die einzelnen Funktionsgruppen der EPEA

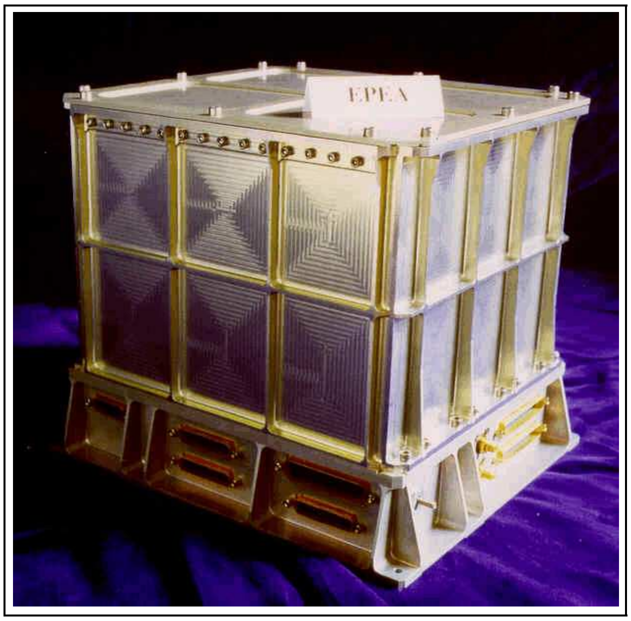



**Abb. 5.1:** Die EPEA-Box.

erfüllen folgende Funktion:

- Sie erzeugen die für die Steuerung des TIMEX, CAMEX und den Ladungstransport auf dem CCD notwendigen Signale.
- Sie stellen die für die Bedienung und Steuerung des CCDs, der Common Mode Hardware und des Quadrantensequenzers notwendigen Software-Befehle zur Verfügung.

- Sie realisieren die verschiedenen Betriebsmodi des CCDs.
- Sie digitalisieren die vom CCD kommenden Signale, nehmen erste Signalkorrekturen vor und geben sie anschließend seriell, mit Zeitinformation versehen, aus.
- Sie verwalten einen Teil der Housekeeping Daten und leiten sie zur EPCE weiter.
- Sie koordinieren die Ansteuerung der einzelnen CCDs auf dem Quadranten.

Die Spannungsversorgung der EPEA wird durch die EPVC gewährleistet. Sie versorgt die EPEA mit einer + 5 V Digital- und ±6 V Analogspannung. Die Flugversion der EPEA-Box besteht aus 9 einzelnen Steckkarten: 4 CPU-Karten, 4 SECOM-Karten und einer Mastersequenzer-Karte. Auf der Mastersequenzer-Karte sind aus Gründen der Redundanz zwei vollständige und voneinander unabhängige Mastersequenzer-Schaltungen integriert.

Jeder Quadrant besitzt seinen eigenen Eventprozessor, wobei sich jeder Eventprozessor aus einer CPU- und SECOM-Karte zusammensetzt. Diese vier Eventprozessoren bilden zusammen die EPEA. Der Mastersequenzer steuert und koordiniert diese vier Eventprozessor-Einheiten.

Für die Messungen dieser Diplomarbeit wurde teilweise noch eine ältere Testversion der EPEA verwendet, die aber hier nicht näher beschrieben werden soll (siehe [Bih96]). Statt dessen werden die einzelnen Komponenten der Flugversion der EPEA nun näher vorgestellt. Dabei wird teilweise nur die Funktion beschrieben, bzw. auch näher auf die technische Realisierung der Einzelkomponenten eingegangen.

## 5.1 Der ADC

Zur Digitalisierung der vom CAMEX kommenden CCD-Signale wird ein AD872 eingesetzt. Dieser ist in einem separaten Aluminiumgehäuse untergebracht (siehe Abbildung 5.2). Dieses Gehäuse ist in der EPEA-Box unterhalb der SECOM-Karte montiert und schirmt den ADC so weitgehend vor störender Strahlung ab.

**Abb. 5.2:** Die ADC-Schaltung mit ADC.

Bevor die Ausgangssignale des CAMEX dem ADC zugeführt werden können, müssen sie dem Eingangsspannungsbereich des ADC, der ±1.024 V beträgt, angepaßt werden. Diese Anpassung übernimmt ein Operationsverstärker der sich auf der EPCH befindet und dem ADC vorgeschaltet ist. Würden die unterschiedlichen Pegel von CAMEX und ADC nicht aneinander angepaßt werden, so hätte dies einen Verlust an Dynamik bei der Analog-Digital-Wandlung zur Folge.

Die analogen Ausgangssignale des CAMEX werden nun in 12 Bit Digital-Werte umgewandelt und der SECOM-Karte zugeführt. Der ADC wird im Flug mit einer Frequenz vom 3.2 MHz betrieben werden, was eine Wandelrate von 3200000 Ereignissen pro Sekunde entspricht. Diese enorme Datenmenge kann aber bei weitem nicht von der Telemetrie des Satelliten verarbeitet werden.

## 5.2 Die SECOM-Karte

In der SECOM-Karte sind mehrere Einzelkomponenten der früher verwendeten "Test-EPEA" integriert. Sie ersetzt die Sequenzer-, DEFA- und Common Mode-Karte der alten Hardware. Die Integration der einzelne funktionalen Gruppen auf einer Karte wurde während der Entwicklungsphase durch sogenannte FPGA-Bausteine (**F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rrays) realisiert.

Diese FPGA-Bausteine ermöglichen es, komplexe Schaltungen mit Hilfe von Entwicklungssoftware auf einer Workstation zu entwerfen und anschließend als Netzliste in einem PROM zu speichern. Die Netzliste wird dann aus dem PROM in den FPGA-Baustein geladen, wo sie entsprechend in eine komplexe Schaltung umgesetzt wird. Diese Art der Entwicklung hat den Vorteil, daß problemlos Änderungen im Design einer Schaltung gemacht werden können. In der Flughardware werden später sog. ASICs (**A**pplication **S**pecific **I**ntegrated **C**ircuits) verwendet werden. Dies sind hochintegrierte Bausteine, die für bestimmte Anwendungen speziell nach den Wünschen des Entwicklers gefertigt werden. Die Schaltungen, die für die FPGAs entworfen wurden, können auf diese Bausteine übertragen und in Klein- wie auch Großserien produziert werden. Auf der SECOM-Karte befinden sich drei dieser FPGAs der Firma XILINX®. Sie sind auf der Abbildung 5.3 deutlich als drei große Quadrate zu erkennen. In jeweils einem dieser Bausteine befindet sich die Quadrantensequenzer , Sortierer- und Common Mode-Schaltung.

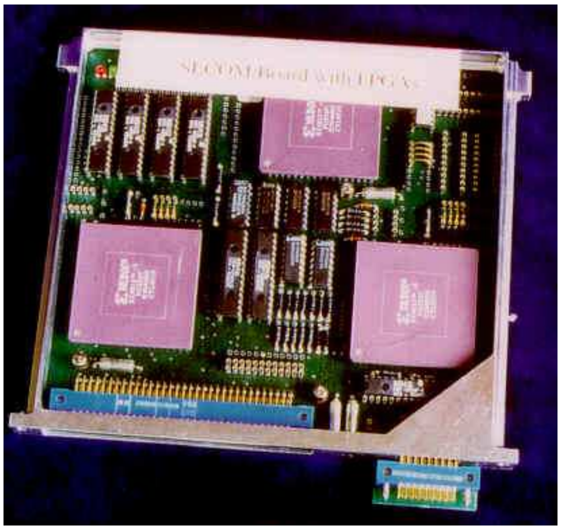


**Abb. 5.3:** Die SECOM-Karte, von links nach rechts sind die Common Mode-, Sortierer- und Quadrantensequenzer-Schaltung zu sehen.

### 5.2.1 Der Quadrantensequenzer

Die vom Quadrantensequenzer ausgegebenen Pulsmuster übernehmen die zeitliche Steuerung der Abläufe in der EPEA. Die Digitalschaltung des Quadrantensequenzers kontrolliert dafür gepulste Signalleitungen, die an den ADC, die Common-Mode Schaltung und den Sortierer weiter geleitet werden. Hier werden auch die Schiebesignale für das CCD, die Steuersignale des CAMEX und TIMEX, die Timing-Signale und die Taktsignale für den ADC generiert. Eine ausführliche Beschreibung des Quadrantensequenzer kann der Diplomarbeit von Bärbel Kretschmar entnommen werden [Kre97].

### 5.2.2 Die Common-Mode Schaltung

Die Daten, die der ADC liefert, müssen korrigiert und aufbereitet werden. Diese Aufgabe übernimmt die Common-Mode Schaltung. Hier findet die erste quantitative Verarbeitung der Daten statt. Die von der Common Mode-Schaltung durchgeführten Korrekturen und Filterungen sehen folgendermaßen aus:

- Signale von schlechten oder rauschenden Pixel werden aus dem Datenstrom eliminiert.
- Den einzelnen Pixel-Daten werden die zugehörigen Zeilen- und Spaltenadressen zugeordnet.
- Ein für jedes Pixel zu Beginn der Messung bestimmter Offsetwert wird subtrahiert.
- Ein fester Offsetwert wird addiert, um negative Ergebnisse bei der Median-Korrektur zu verhindern.

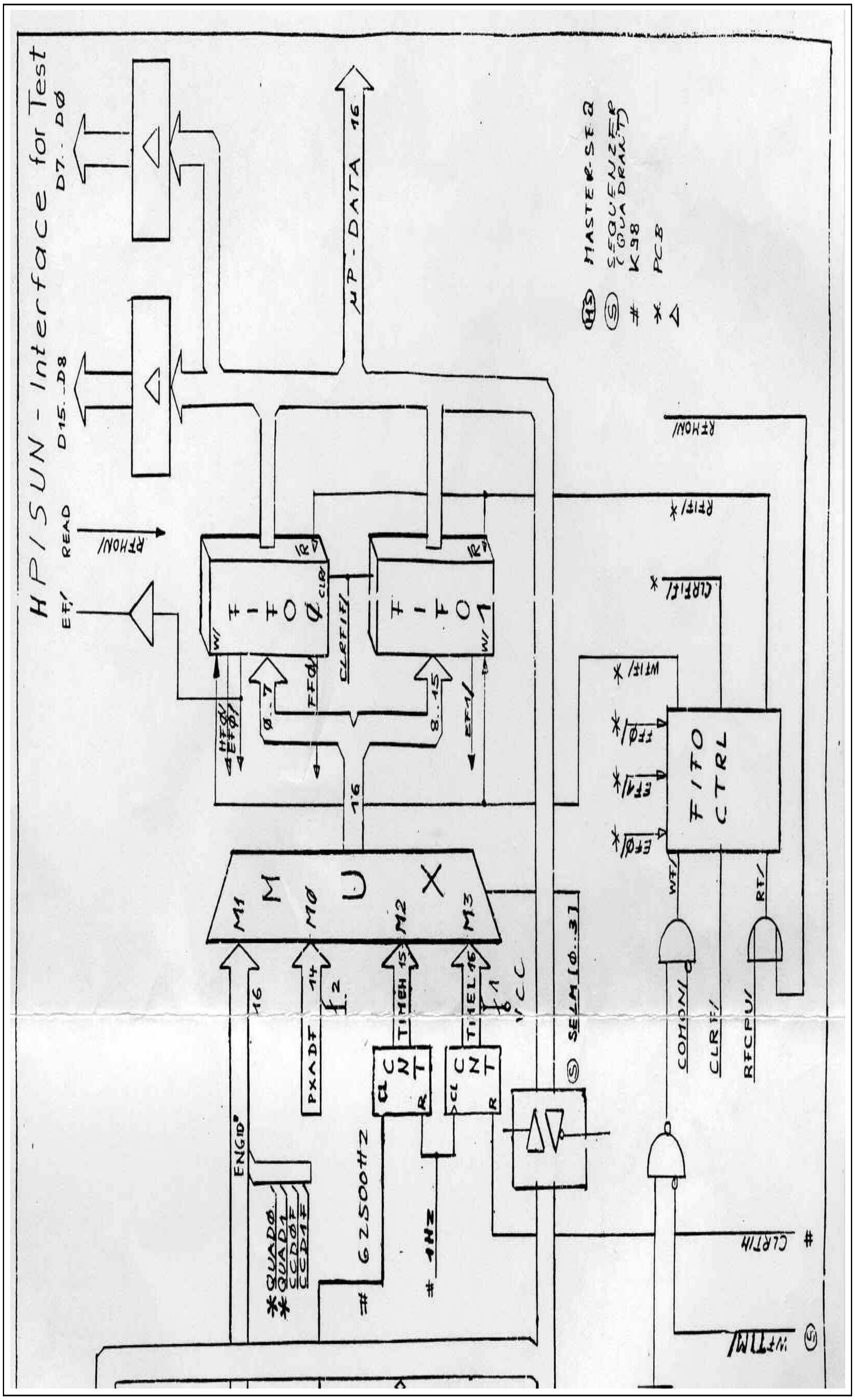



**Abb. 5.4:** Die Common-Mode Schaltung.

- Die Daten werden Common-Mode korrigiert (Median-Korrektur).
- Aus den korrigierten Ereignissen werden die tatsächlichen Röntgenereignisse durch Vergleich mit einer unteren Schwelle herausgefiltert.
- Die gültigen Daten werden in ein Daten-FIFO geschrieben und von der CPU ausgelesen.

Im weiteren Verlauf des Kapitels soll nicht näher auf die genaue Funktionsweise der Common-Mode Schaltung eingegangen werden. Sie wurde schon in einer vorangegangenen Arbeit beschrieben und hat sich nur in geringfügigen Details geändert [Bih96]. Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 5.4 ein Blockschaltbild der Common-Mode Hardware dargestellt. In Hinblick auf die später in Abschnitt 7 behandelte Offsetkorrektur wird die Funktion dieser Korrektur jedoch noch einmal genauer erklärt.

#### Die Offsetkorrektur und Bad-Pixelmarkierung

Zu Beginn jeder Messung muß der Offset jedes einzelnen CCDs berechnet werden (siehe Abschnitt 4.2). Die Offsetwerte für jedes einzelne Pixel werden nach ihrer Bestimmung vom Prozessor im Offset-RAM abgelegt. Diese Werte werden dann automatisch von der Common-Mode Hardware zur Korrektur der Daten verwendet. Außerdem werden von der CPU bei der Berechung der Rauschkarte im Offset-RAM schlechte Pixel markiert. Die Offsetwerte werden als 16-Bit Worte im 16 Bit breiten Offset-RAM gespeichert. Das Ablageformat ist in der Übersicht der Datenformate am Ende des Kapitels in Tabelle 5.4 dargestellt. Die 4 oberen (most significant, MSB) Bits legen die Eigenschaften des Pixels fest. Je nach dem ob ein Pixel schlecht ist (bad), einen besonders hohen Offset besitzt (bright), kein Signal liefert (dead) oder überdurchschnittlich rauscht (noisy), werden die jeweiligen Bits gesetzt. Der Offsetwert ist in den nachfolgenden 12 Bits codiert, was bedeutet, daß 4096 verschiedene Energiewerte möglich sind.

### 5.2.3 Das High Bit Rate Interface (HBR I/F)

Zusätzlich zu den oben erwähnten Schaltungen befindet sich für jeden Quadranten auf den SECOM-Karten ein **H**ight **B**it **R**ate Interface (HBR). Es handelt sich hierbei um eine synchrone serielle 16-Bit Schnittstelle, die auf der SECOM-Karte integriert ist. Über diese Schnittstelle werden die wissenschaftlichen Daten von der EPEA an die EPDH an Hand eines speziellen Datenprotokolls übertragen.

## 5.3 Der Mastersequenzer

Die Ansteuerung der einzelnen Quadranten übernimmt der Mastersequenzer. In der Flugversion soll der Mastersequenzer mit einem Quarz mit 25 MHz getaktet werden, was einer minimalen Auslesezeit von ca. 4.66 ms (5.83 ms beim EQM) für ein CCD im Full-Frame Modus entspricht. Für das elektrische Qualifikationsmodell (EQM) arbeitet der Mastersequenzer mit einer Taktfrequenz von 20 MHz, da die FPGA-Bausteine der SECOM-Karte für eine höhere Frequenz nicht schnell genug sind.

**Das Mastersequenzer Kontroll-Register**

| Bit 15 | | | | | | | | | | | | | | | Bit 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x | x | x | x | x | x | E/D | S/P | SL3 | SL2 | SL1 | SL0 | IS3 | IS2 | IS1 | IS0 |

**Tab. 5.1:**

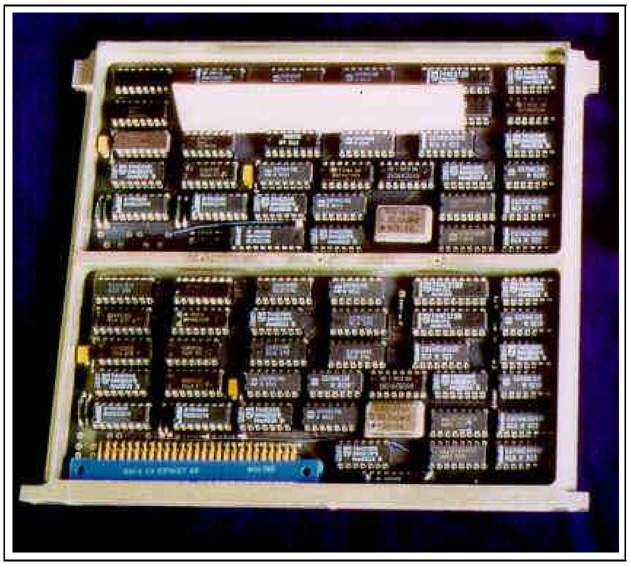


**Abb. 5.5:** Der Mastersequenzer.

Der Mastersequenzer erhält von der EPCE Kommandosequenzen, die Informationen über die aktiven Quadranten, das Verhältnis von Integrationszeit zu Auslesezeit und die Art des Auslesens enthalten. Die Kommandierung ist in Form eines Registers auf dem Mastersequenzer implementiert, in dem einzelne Bits gesetzt werden können. Die Aufschlüsselung der einzelnen Bits kann der Tab. 5.1 entnommen werden.

Ihre Bedeutung ist wie folgt:

- Der 4 Bit lange Integerwert von **IS0** bis **IS3** legt die Anzahl der Wartezyklen zwischen zwei Auslesezyklen benachbarter Quadranten fest, in Einheiten von 13.2 ms (10.6 ms beim Flugmodell).
- Die Bits **SL0** bis **SL3** selektieren die einzelnen Quadranten. Eine 1 bedeutet, daß der Quadrant aktiv ist, eine 0 bedeutet, der Quadrant wird nicht ausgelesen.
- Zwischen parallelem und seriellem Auslesen, kann mit dem Bit 8 , **S/P**, umgeschaltet werden.
- Das letzte aktive Bit, **E/D**, schaltet die Mastersequenzer-Clock, und damit auch den Mastersequenzer, an (1) oder aus (0).

Entsprechend dem Bitmuster im Kommando-Register generiert der Mastersequenzer die Steuersignale für die 4 Quadrantensequenzer. Dies sind die 4 Clock-Pulse QCLOCK [0..3] und die 4 Einschaltsignale QSEQ [0..3]. Als Rückmeldung erhält der Mastersequenzer 4 Signale, die das Ende eines Auslesezyklus der Quadranten bestätigen (QSEQRDY[0..3]) und den Beginn der nun folgenden Integrationszeit signalisieren.

## 5.4 Die CPU-Karte

Das Herzstück der CPU-Karte bildet der Microprozessor, ein 80C86 der Firma Harris in einer stahlungsfesten Ausführung, mit 192 kByte Arbeitsspeicher. Getaktet wird die

CPU von einem Quarz mit einer Frequenz von 4.91 MHz. Die Speicherung der Software zur Steuerung des Prozessors, übernehmen 32 KByte große PROMs (EEPROMs fürs EQM). Die CPU ist für die Steuerung der gesamten Eventprozessors zuständig. Die dazu notwendige Verbindung zu den übrigen Komponenten des Eventprozessors stellt ein 16 Bit breiter Daten- und Adreßbus her, über den Befehle an den Quadrantensequenzer und die Common-Mode Schaltung weiter geleitet werden.

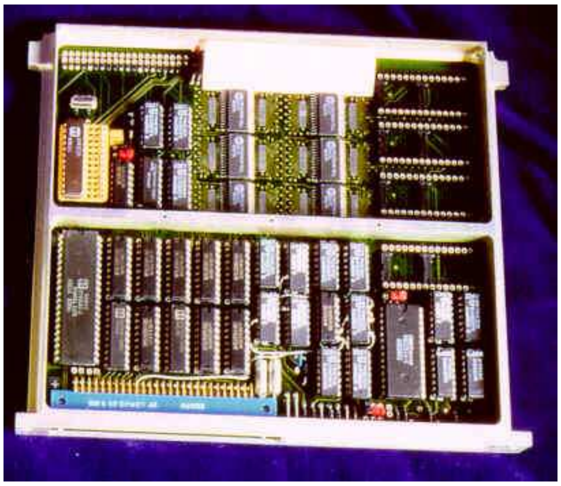


**Abb. 5.6:** Die CPU-Karte mit Arbeitsspeicher, Speicher für die Software und Schnittstellen.

Ebenfalls auf der CPU-Karte befindet sich der Speicher zur Berechnung der zur Datenkorrektur notwendigen Tabellen, wie Offset-, Rausch- und Badpixelkarten. Diese Korrekturtabellen werden von der CPU berechnet und bis zur vollständigen Berechnung im RAM der CPU zwischengespeichert. Anschließend wird die Offsettabelle mit Badpixelinformation in das Offset-RAM der SECOM-Karte kopiert. Von dort kann sie von der SECOM-Karte direkt angesprochen und zur Verarbeitung der CCD-Daten weiter verwendet werden.

Die Aufgaben der CPU-Software sind die folgenden:

1. Die wichtigste Aufgabe der CPU besteht darin, den Datenfluß zwischen dem Ausgangs-FIFO der SECOM-Karte und dem HBR aufrecht zu erhalten, von wo aus die Daten an die EPDH und anschliesend an die Erde gesendet werden.

2. Die Software soll auch die in den wissenschaftlichen Daten unerwünschten MIPs (**M**inimal **I**onizing **P**articles) aus dem Datenstrom herausfiltern. Diese MIPs der kosmischer Strahlung hinterlassen in den CCD-Bildern markante Spuren, die aber bei der Datenanalyse unerwünscht sind [Bru95].

3. Die Software der CPU muß in der Lage sein, die Offset- und Common Mode Hardware zu steuern. Die Offset-, Rausch- und Bad Pixel-Karten müssen berechnet und im entsprechenden Speicherbereich abgelegt werden.

4. Die Hardware-Karten und Zähler müssen durch die Software zurücksetzbar sein, d.h. sie müssen zu jedem Zeitpunkt in einen definierten Ausgangszustand zurückgebracht werden können.

5. Housekeeping Daten sollen von der CPU-Software überwacht und gespeichert werden, und auf Anforderung an die EPCE Übertragen werden.

6. Die Hard- und Software-Schnittstellen müssen durch die Software testbar sein.

7. Die Software selbst soll im Falle einer Fehlfunktion von der Erde aus korrigier- und erweiterbar sein (DEBUG-Modus).

Die Software der CPU liest die Ereignis- und Zeitdaten aus dem Daten-FIFO der SECOM-Karte aus, wo sie als zwei 16-Bit Worte bereitstehen. Bei jedem Auslesezyklus werden momentan 256 Ereignisse in Form von zwei 16-Bit Worten ausgelesen und im Arbeitsspeicher zwischengelagert. Aus den Daten werden zum Teil Zählerinformationen generiert, die Daten werden auf Wunsch MIP-korrigiert und mit Zeitinformationen versehen an das HBR weitergegeben.

Die Datenrate, die die CPU bewältigen kann, liegt bei ungefähr 18000 $\frac{\text{Events}}{\text{sec}}$, wenn die CPU mit 5 MHz getaktet wird und keine MIP-Korrektur erfolgt. Die von der Telemetrie für die pn-Kamera vorgegebene maximale Datenrate liegt bei 1250 $\frac{\text{Events}}{\text{sec}}$, was 40 $\frac{\text{kbits}}{\text{sec}}$ entspricht. Dies zeigt, daß die CPU bei weitem in der Lage sein sollte, trotz MIP-Korrektur die maximale Telemetrierate auszunutzen.

### 5.4.1 Das Low Bit Rate Interface (LBR I/F)

Das **L**ow **B**it **R**ate Interface (LBR), auch "Rosat-Interface" genannt, ist ein synchrones, serielles 16 Bit Interface zwischen der CPU der EPEA und der EPCE. Es hat insgesamt zwei Funktionen:

1. Kommandosequenzen werden von der EPCE über das LBR an die EPEA geschickt.
2. Die Housekeeping-Daten werden auf Anforderung der EPCE von der EPEA an die EPCE über das LBR übermittelt.

Zu den Housekeeping-Daten gehören neben den Zustands-Daten der EPEA, wie z.B. der Temperatur des ADC, auch die Offset-, Bad-Pixel- und Rauschtabellen. Das 16 Bit breite Interface wird in 8 MSB und 8 LSB aufgeteilt. Die MSBs werden zum Empfangen und die LSBs zum Senden von Daten verwendet.

Die EPCE arbeitet bei der Kommandosteuerung als eine Art Puffer. Alle von der EPDH für die EPEA bestimmten Kommandosequenzen werden zuerst zur EPCE geleitet. Dort werden sie in die richtige Kommandostruktur verpackt und an den entsprechenden Quadranten der EPEA-Box weitergegeben.

Im Labor wird die EPCE durch eine Workstation simuliert. Von dieser Workstation werden die Befehle an die CPU über eine serielle RS232 Schnittstelle an das LBR übertragen.

### 5.4.2 Die Zählerinformationen

In den Datenstrom werden von der Software der CPU nach jedem 20. Zeitwort Zählerinformationen eingefügt. Diese Zähler beinhalten Informationen über den Datenstrom innerhalb der SECOM-Karte und der CPU. Insgesamt sind 5 Zähler implementiert, die teilweise von der Software generiert oder auch aus Registern der SECOM-Karte ausgelesen werden. Die Zähler sind im einzelnen in Tabelle 5.2 zusammengefaßt.

| **Zähler** | **Bedeutung** |
|---|---|
| ATHR Counter | Above Threshold Counter |
| FIFR Counter | FIFO Read Counter |
| EPDH Counter | Send to EPDH Counter |
| DSLIN Counter | Discarded Line Counter |
| MCM | Mean Common Mode |

**Tab. 5.2:** Die von der CPU in den Datenstrom eingefügten Zählerinformationen.

Das Datenformat der Zählerinformationen ist in Tabelle 5.4 wiedergegeben. Die drei 32 Bit Worte können anhand der ersten zwei Bits als Zähler identifiziert werden. Die darauf folgenden 14 bzw. 16 Bits enthalten die Zählerinformation. Die Bedeutung der einzelnen Zähler ist wie folgt:

1. Der ATHR Zähler gibt die Anzahl der über der programmierten Schwelle WELEV-LOW liegenden Ereignisse nach der Bad-Pixel Korrektur an.
2. Der FIFR Zähler beinhaltet die Zahl der von der CPU-Software aus dem FIFO gelesenen Datenworte.
3. Der EPDH Zähler zeigt die Zahl der an die EPDH gesendeten Pixel an.
4. DSLIN zählt die von der MIP-Korrektur der CPU-Software verworfenen Spalten.
5. MCM stellt die Summe aus den 200 Median Werten des letzten verarbeiteten CCDs dar, d.h. im Full-Frame Modus würde dies den Median Werten des CCD 2 entsprechen.

### 5.4.3 Die Befehlsstruktur der EPEA

Die Befehlsstruktur der EPEA ist auf der sogenannten ROSAT-Befehlsstruktur aufgebaut. Die Befehle, die die EPEA erreichen, bestehen aus einem Block von 32 Bit langen Befehls-Worten. Die eigentlichen Befehle sind in eine Struktur aus Kopfzeile und CRC-Polynom eingebettet. Tabelle 5.3 zeigt die Befehlsstruktur im Detail.

**Die EPEA Befehlsstruktur**

| Kommando (hex) | Beschreibung |
|---|---|
| 000000ab (32 bit) | Header |
| 00c1abcd | Kommando c1 mit 1 Parameter abcd |
| 00c2abcd<br>0009efgh<br>0009ijkl | Kommando c2 mit 3 Parametern; abcd = 1. Paramter<br>efgh = 2. Parameter<br>ijkl = 3. Parameter |
| 0003abcd | CRC-Polynom |

**Tab. 5.3:**

Der Header beinhaltet die Anzahl der folgenden Kommandos inklusive des CRC-Polynoms. Darauf folgen die eigentlichen Befehle mit den entsprechenden Parametern. In der Tabelle 5.3 ist als Beispiel der erste Befehl mit nur einem Parameter "abcd" und der darauffolgende zweite Befehl mit drei Parametern angegeben. Die Anzahl der Parameter richtet sich nach dem Aufbau der Befehle und ist befehlsspezifisch. Alle Parameter sind wie aus der Hexadezimaldarstellung hervorgeht 16 Bit lang. Am Ende des Blocks folgt ein CRC-Polynom, das als Prüfsumme eingesetzt wird, um mögliche Übertragungsfehler zu erkennen.

## 5.5 Die Datenformate der EPEA

Die folgende Tabelle 5.4 zeigt die wichtigsten Datenformate die von der EPEA benutzt werden. Das Datenformat des Transparent Modus weicht vom Datenformat der sonstigen Modi ab. Hier werden definierte Pixel immer wieder der Reihe nach ausgelesen. Aus dieser Art des Auslesens ergibt sich automatisch auch die Spalten und Zeileninformation, da immer alle Pixel übertragen werden und nicht nur die, die über einer bestimmten Schwelle liegen. Im Datenformat für die Offsetwerte ist zusätzlich der Pixelstatus mit kodiert, der in Tabelle 5.5 erklärt wird. Der "Noise Value" der übertragen wird entspricht noch nicht dem entgültigen $\sigma$. Um dies zu erhalten muß der "Noise Value" durch die Anzahl der Bilder geteilt und aus dem sich ergebenden Wert die Wurzel gezogen werden, also $\sigma = \sqrt{\frac{\mathrm{Noise Value}}{\mathrm{N_{frame}}}}$.

**Das Datenformat der einzelnen Ereignisse**

MSB ... LSB

<table>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr>
<tr><td>0</td><td>0</td><td colspan="8">Line Identifier</td><td colspan="6">Column Identifier</td></tr>
<tr><td colspan="4">CCD ID</td><td colspan="12">Event Energy</td></tr>
</table>

**Das Datenformat im Transparent Modus**

<table>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr>
<tr><td colspan="4">Not Used</td><td colspan="12">Pixel Energy</td></tr>
</table>

**Das Datenformat für Offsetwerte**

<table>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr>
<tr><td colspan="4">Pixel Status</td><td colspan="12">Offset Value</td></tr>
</table>

**Das Datenformat für Rauschwerte**

<table>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr>
<tr><td colspan="16">Noise Value</td></tr>
</table>

**Das Datenformat für Zeitworte**

<table>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="15">Seconds</td></tr>
<tr><td colspan="16">Fraction of Second 20.48 $\mu$s (25.60 $\mu$s beim EQM)</td></tr>
</table>

**Das Datenformat für Zählerinformationen**

<table>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td colspan="14">x</td></tr>
<tr><td colspan="16">ATHR Counter</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td colspan="14">FIFR Counter</td></tr>
<tr><td colspan="16">EPDH Counter</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td colspan="14">DSLIN Counter</td></tr>
<tr><td colspan="16">Mean Common Mode</td></tr>
</table>

**Tab. 5.4:** Die Datenformate die von der EPEA zur Speicherung und zum Transfer der Daten zur EPCE und EPDH verwendet werden.

**Die Pixel Status Kodierung im Offset Format**

| Bit | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| Bad Pixel | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Flickering Pixel | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Bright Pixel | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Dead Pixel | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Good Pixel | 0 | x | x | x |

**Tab. 5.5:** Die Tabelle zeigt die Kodierung der ersten 4 Bits im Datenformat der Offsetwerte.

# Kapitel 6

# Die Eigenschaften der Übergänge zwischen CCDs und Quadranten

Bevor die Messungen und Ergebnisse im Detail dargestellt werden, sollte an dieser Stelle der Meßaufbau, der zur Zeit dieser Arbeit benutzt wurde, näher erklärt werden. Ein Großteil der Messungen für diese Diplomarbeit wurde an der Röntgentestanlage des IAA in Tübingen durchgeführt. Diese Anlage befindet sich im Hofgebäude des Instituts und erlaubt den Betrieb eines einzelnen CCDs. Zu den Messungen wurde ein speziell angefertigtes CCD verwendet, in das die Strukturen von Quadranten- und CCD-Übergängen eingearbeitet sind. Zusätzlich konnten auch Daten, die an der ZETA-Anlage des MPE in Garching gewonnen wurden, mit ausgewertet werden.

Für die Auswertung der CCD-Daten wurde überwiegend das von Edgar Bihler in IDL® geschriebene Programm "fahne" verwendet. Teilweise wurde diese Software an die speziellen Anforderungen des CCDs C8_1_10 angepaßt, bzw. erweitert.

## 6.1 Die Röntgentestanlage am IAAT

### 6.1.1 Der Experimentelle Aufbau

Die Röntgentestanlage in Tübingen besteht aus einer kleinen Vakuumkammer, in der ein einzelnes CCD betrieben werden kann. Das für den Betrieb des CCDs notwendige Vakuum von etwa $10^{-8}$ mbar wird durch eine Turbomolekularpumpe der Firma Alcatel erzeugt. Gekühlt wird das CCD mit einer Helium-Kühlanlage, die mit einem geschlossenen He-Kreislauf arbeitet. Sie funktioniert nach dem Prinzip der adiabatischen Expansion und kann an der kältesten Stelle des Kühlfingers eine Temperatur von 30 K erzeugen. Diese Kühlung ist direkt über einen Kühlfinger mit der CCD-Halterung verbunden und sorgt für die notwendige Betriebstemperatur des CCDs von ca. -130° C. Eine Gegenheizung übernimmt die Temperaturstabilisierung des CCDs, so daß die Temperatur am CCD bis auf $\pm 0.3°$ C über mehrere Tage hinweg stabil ist. Die Temperaturmessung auf dem CCD erfolgt mit eine Diode, die von einer Konstantstromquelle versorgt wird. Die Kennlinie dieser Diode verändert sich in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, bei der die Diode betrieben wird. Dieser Effekt wird ausgenutzt um die Temperatur des CCDs zu bestimmen.

Zusätzlich sind an der Anlage Drucksensoren und ein Belüftungsventil angebracht. Belüftet wird die Kammer mit trockenem $N_2$, um eine Verschmutzung des Rezipienten auszuschließen.

Vor dem CCD ist eine Blendenhalterung an einer Vakuumdurchführung angebracht, die es erlaubt, verschiedene Blenden in den Strahlengang vor das CCD zu bringen (Abbildung 6.1). Im Betrieb ermöglicht der Aufbau eine Flat-Field Bestrahlung des CCDs. An Hand verschiedener Blenden können auch punkt- oder strichförmige Quellen simuliert werden. Zusätzlich kann ein mechanischer Chopper eingebaut werden, zur Simulation zeitlich variabler Quellen. Als Röntgenquelle wird ein radioaktives Präperat aus $^{55}_{26}$Fe benutzt. $^{55}_{26}$Fe zerfällt durch einen Elektroneneinfang mit einer Halbwertszeit von 2.73 Jahren in $^{55}_{25}$Mn. Das durch den Elektroneneinfang frei werdende innere Energieniveau der K-Schale des Fe-Atoms kann durch Elektronen höherer Energieniveaus besetzt werden. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von $K_\alpha$- und $K_\beta$-Strahlung abgegeben. Die Energie dieser $K_\alpha$- und $K_\beta$-Strahlung liegt bei 5.897 keV bzw. 6.488 keV. Die Übergangswahrscheinlichkeit ist für den niederenergetischen Übergang mit 25 % höher, als für den $K_\beta$-Übergang, der eine Übergangswahrscheinlichkeit von 3.4 % besitzt. Bei diesen beiden Energien wurde ein Großteil der Messungen am CCD C8_1_10 durchgeführt.

### 6.1.2 Das Datenaquisitionssystem

In Abbildung 6.1 ist eine schematische Übersicht der einzelnen Komponenten des Datenaquisitionssystems für den Betrieb eines einzelnen pn-CCDs dargestellt. Die Signale des CCDs werden über eine abgeschirmte Leitung aus der Vakuumkammer herausgeführt und gelangen zu einem Operationsverstärker (OP). Das Ausganssignal des CCDs wird durch den OP auf den Eingangsbereich des ADC von $\pm$ 1.024 V anpaßt, danach werden die Detektorsignale der EPEA-Box zugeführt. Nach der Signalverarbeitung im Eventprozessor der EPEA werden die Daten von der CPU an einen PC übergeben, der über eine RS422 Schnittstellen-Karte mit dem HBR verbunden ist. Dieser PC sammelt die ankommenden Daten in einem Eingangs-FIFO und "verpackt" sie, an Hand einer speziellen Software, in das sogenannte ROSAT-Datenformat. Die so erzeugten Datenpackete, auch ROSAT-Rahmen genannt, werden über eine Ethernetleitung auf eine HP-Workstation 715/50 kopiert. Dort können die CCD-Daten mit einer Datenanalysesoftware ausgewertet werden.

Die Kommandierung des Eventprozessors erfolgt über eine serielle RS232 Schnittstelle der Workstation. Die RS232 Schnittstellennorm der Workstation wird mit einem Schnittstellkonverter auf die RS422 Norm des LBR der CPU angepaßt. Zur Kontrolle der Kommandierung des Eventprozessors ist ein VT100 Terminal in den seriellen Datenstrom eingeschaltet, so daß eventuelle Rück- und Fehlermeldungen der CPU auf diesem Terminal verfolgt werden können.

Zur Zeit wird für die Kommandierung des Mastersequenzer noch ein Laptop verwendet. Die Verbindung der EPEA mit dem Laptop wird über die Power- und Kommando-Box hergestellt, die die Steuersignale vom Laptop zur EPEA weiterleitet. Diese Box bietet unter anderem die Möglichkeit die Kommandosequenzen für die CPU durchzuschleifen (gestrichelte Verbindung). Dieser Aufbau wurde zur Zeit dieser Diplomarbeit in Garching an der ZETA-Anlage verwendet. Die Power-Box versorgt die EPEA auch mit den notwendigen analogen $\pm$6V und digitalen +5V Versorgungsspannung für die einzelnen Quadranten und die Mastersequenzer-Schaltung.

## 6.2 Struktur des CCDs C8_1_10

Wie im Kapitel 4 beschrieben wurde, ist das CCD-Array nicht aus einem homogenen CCD aufgebaut, vielmehr ist der Detektor in vier Quadranten unterteilt und zusätzlich jeder Quadrant in drei einzelne CCDs. Die Grenzen an denen die CCDs und Quadranten sich berühren, sind nun Thema des folgenden Kapitels. Im Vordergrund steht dabei neben der Struktur der Übergänge, die Untersuchung der Eigenschaften und die Bestimmung der

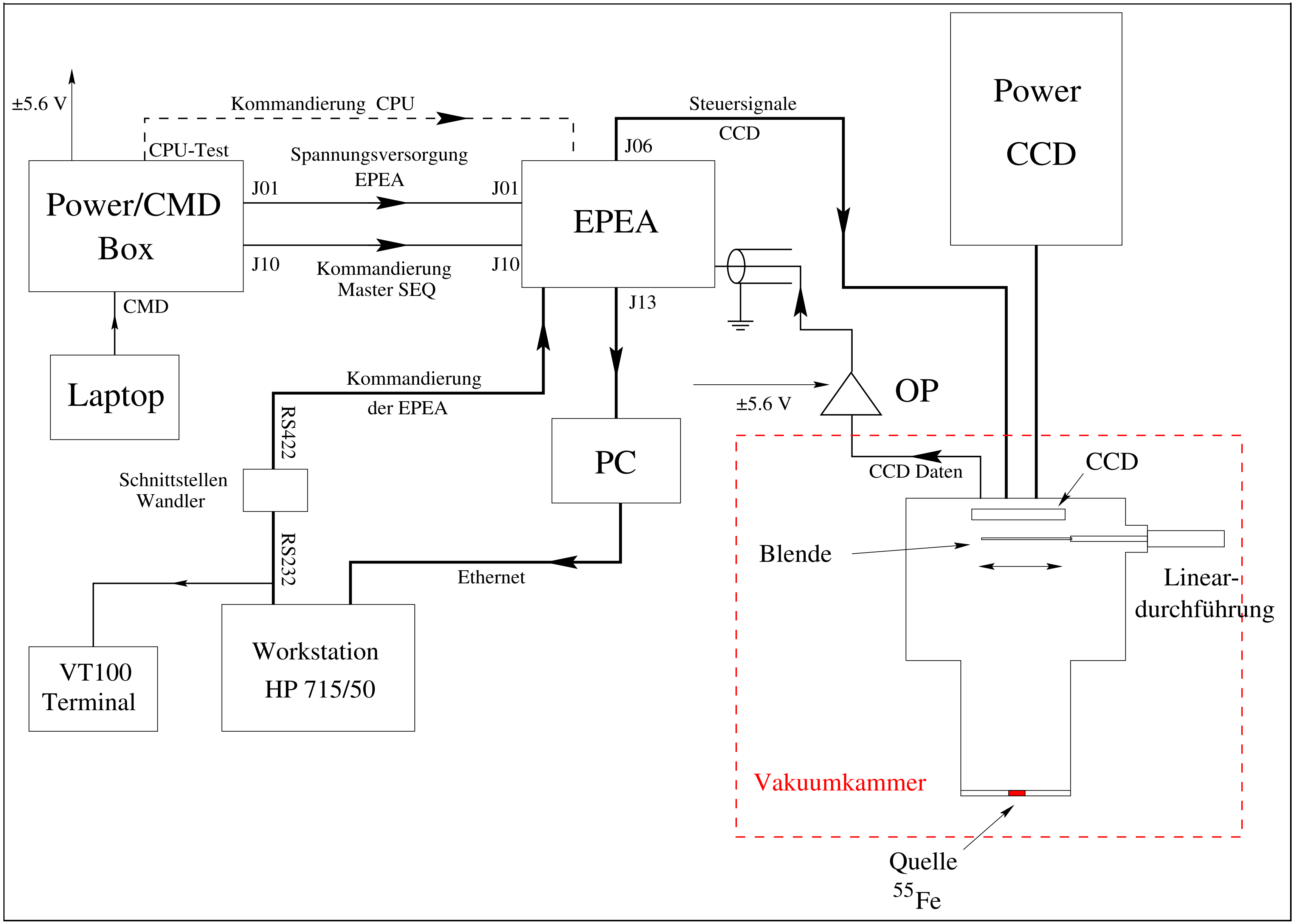



**Abb. 6.1:** Das Datenerfassungssystem im Hofgebäude des IAAT zum Betrieb eines Einzel-CCDs.

Quanten Effizienz (QE) im Vergleich zum restlichen CCD. Bevor die Messungen ausführlich besprochen werden, soll der Aufbau und die Halbleiterstruktur des CCDs der Version C8_1_10 dargestellt werden.

Im wesentlichen gibt es zwei verschiedene Arten von Übergängen auf einem CCD-Array. Die Grenzen zwischen zwei Quadranten und die Grenzen zwischen zwei CCDs. Sie unterscheiden sich sehr stark im Aufbau der Halbleiterstruktur des CCDs. Während die Trennung zweier CCDs durch eine Auftrennung der Phi-Register erreicht wird, ist an den Grenzen der Quadranten zusätzlich der Rückkontakt des CCDs unterbrochen. Um die Effekte die durch die Übergängen verursacht werden zu entkoppeln, wurden auf dem CCD C8_1_10 die beiden Strukturen getrennt.

### 6.2.1 Die Phi-Bus Trennung

Bei der Trennung zweier CCDs muß die Funktionalität des Nachbar-CCDs im Falle eines Defekts erhalten bleiben. Um die einzelnen Spalten physikalisch voneinander zu trennen, werden die Phi-Register zwischen den CCDs aufgespalten. Zur Gewärleistung der Betriebssicherheit der CCDs, werden die Spannungen für die Phi-Register auf beiden Seiten der CCDs zugeführt. Aus diesem Grund befinden sich zwischen den CCDs Registerzuführungen, die die Phi-Pulse an die p-Register anlegen. Die Abbildung 6.2 zeigt den Aufbau eines solchen Übergangs zwischen zwei CCDs.

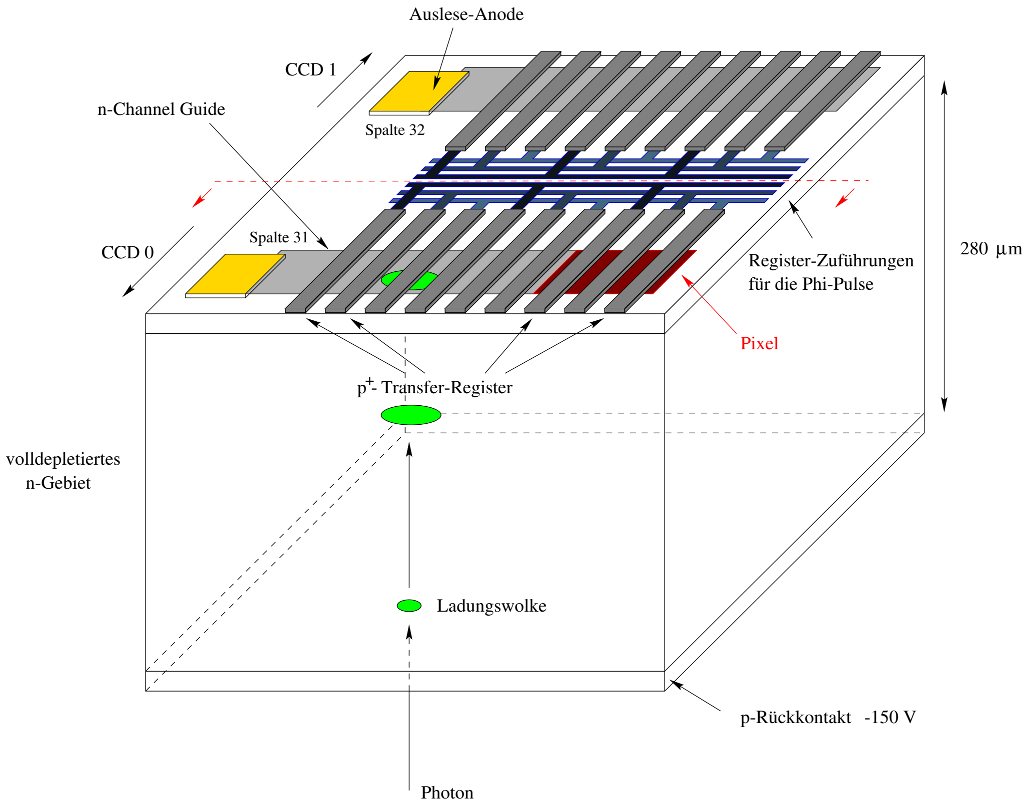



**Abb. 6.2:** Die Struktur des Übergangs zwischen zwei CCDs.

In der Zeichnung ist die Struktur des CCDs in der Umgebung eines CCD-Übergangs dargestellt. Links im Bild befindet sich die gelb markierte Auslese-Anode, auf die die erzeugten Ladungen mit den positiven Phi-Pulsen geschoben werden. Ein einzelnes Pixel wird senkrecht zur Spaltenrichtung durch drei $p^+$-Register begrenzt. Drei $p^+$-Register sind deshalb notwendig, weil zum Transport der Ladungen eine Potentialmulde in Spaltenrichtung gebildet werden muß. Werden die Phi-Pulse zeitlich variiert, dann können wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, die Ladungen zur Anode geschoben werden. In der zweiten Dimension ist das Pixel über ein tiefes n-Implantat definiert, dem sogenannten Channel-Guide und Channel-Stop. Die Ladungen werden also in einer sowohl in Spalten-, wie auch Zeilenrichtung wohl definierten Potentialmulde transportiert. Neben der Spalte 31 des CCDs C8_1_10 befinden sich die Registerzuführungen für die Phi-Pulse der unteren Spalten von 0-31. Diese Spalten würden bei einem CCD-Array z.B. den Spalten des CCD 0 entsprechen. Direkt neben den Registerzuführungen für die Spalten 0-31 sind die für die Spalten 32-63 angebracht, diese Spalten würden folglich zum CCD 1 gehören. Wird nur die Struktur vor der gestrichelt eingezeichneten roten Linie betrachtet dann zeigt das Bild eine Randspalte, z.B. Spalte 63, eines einzelnen CCDs.

### 6.2.2 Der Rückkontaktschnitt

Der Rückkontaktschnitt, der für die Trennung zweier Quadranten verantwortlich ist, ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Der $p^+$-Rückkontakt, der sonst eine homogene Fläche über die Rückseite eines ganzen CCDs bildet, ist an den Grenzen eines Quadranten aufgetrennt. Im Bereich, der durch die Trennung entsteht, befindet sich auf der Rückseite des CCDs eine isolierende $SiO_2$-Schicht. Auf diese $SiO_2$-Schicht ist wiederum ein leitender Aluminiumkontakt aufgebracht. Dieser Kontakt ist wichtig, um die Depletion des n-Substrats unter dem Übergangsbereich aufrecht zu erhalten. Durch anlegen einer Spannung an den Aluminiumkontakt kann der Potentialverlauf im n-Gebiet gesteuert werden und damit auch der Depletionsbereich. Durch diese Struktur wird zusätzlich gewährleistet, daß die Rückkontakte der Quadranten galvanisch voneinander getrennt sind. Dies ist vorallem wichtig für den Fall, daß ein Quadrant ausfällt. Im Falle eines defekten Quadranten müssen die übrigen Quadranten noch einen funktionierenden und eigenständigen Rückkontakt besitzen.

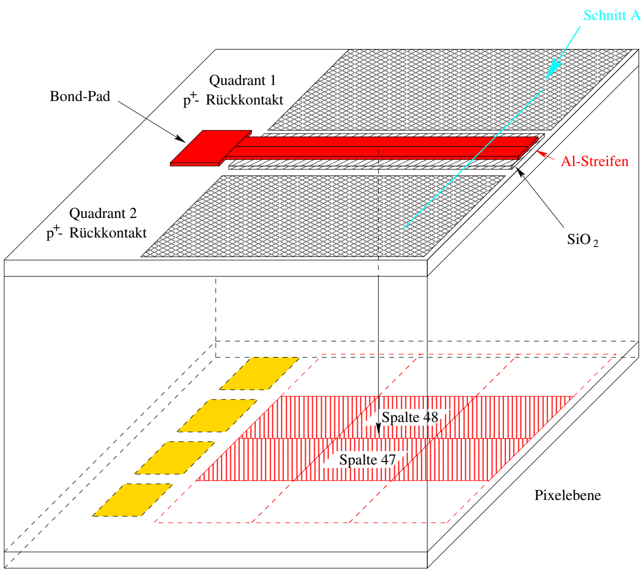



**Abb. 6.3:** Die Struktur des Rückkontaktübergangs.

Der Aluminiumkontakt war beim CCD C8_1_10 **nicht** mit dem Rückkontakt des übrigen CCDs verbunden. Dies führt dazu, daß sich die Aluminiumschicht nicht auf einem definierten elektrischen Potential befindet, sondern daß sich ihr Potential langsam an die Gegebenheiten der Umgebung anpaßt. Beim CCD C8_1_10 befindet sich der Aluminiumstreifen über den Spalten 47 und 48 und verläuft in Spaltenrichtung.

## 6.3 Die Eigenschaften eines CCD- und Rückkontakt-Übergangs

Die Eigenschaften der Grenzen des CCD-Arrays sind vorallem im Zentrum des CCDs von großer Bedeutung, weil dort bei Beobachtungen im Orbit, das Bild der Röntgenquelle fokussiert sein wird. Im Zentrum des Arrays treffen aber die Rückkontakt-Übergänge aller vier Quadranten aufeinander, was bedeutet, daß dort die Auswirkungen der Rückkontakt-

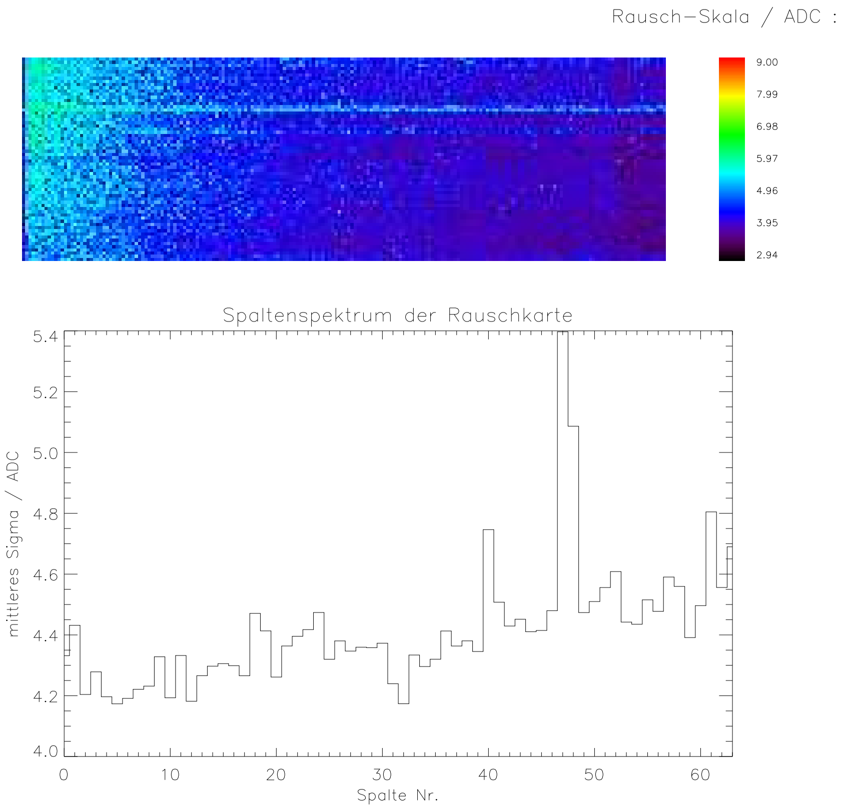



**Abb. 6.4:** Die Rauschkarte des CCDs C8_1_10 und deren Spaltenverteilung.

Struktur am größten sein werden. Falls die Effekte, die von den Übergängen verursacht werden, sich all zu sehr auf das Spektrum und die Ortsauflösung auswirken, hätte dies natürlich ernsthafte Folgen für die Qualität der Beobachtung.

Bevor die Eigenschaften des CCD Signals, die von Photonenbestrahlung abhängen untersucht werden, müssen die Auswirkungen der CCD-Übergänge auf das CCD Signal eines unbestrahlten CCDs bekannt sein. Hierzu wurden zu Beginn dieser Arbeit die für das CCD charakteristischen Daten wie Rauschen, Offset und Verstärkung untersucht.

### 6.3.1 Rauschen und Offset

#### Rauschen

Wie im Abschnitt 4.2.2 beschrieben wurde, setzt sich das Gesamtrauschen aus mehreren Rauschbeiträgen zusammen. Bei der Berechnung der Rauschwerte aus dem CCD Signal kann mit dem verwendeten Messaufbau nur das Gesamtrauschen des CCDs bestimmt werden, d.h. es kann keine direkte Aussage über die einzelnen Anteile gemacht werden. Eine Auftrennung der Rauschanteile kann nur durch spezielle Testanordnungen erreicht werden, mit denen z.B. auch rückwärts geschoben werden kann.

Die elektronischen Komponenten der EPEA können zum Gesamtrauschen der Übergänge keinen zusätzlichen Beitrag liefern, da die Elektronik die CCD-Daten aller Spalten gleich verarbeitet. Mögliche Ursachen für ein anderes Rauschverhalten einzelner CCD-Bereiche müssen also direkt in der Pixel- oder Anodenstruktur gesucht werden, die Einfluß auf Störstellen oder Leckströme haben. Eine berechnete Rauschkarte des CCDs C8_1_10 zeigt die Abbildung 6.4. Bei genauer Betrachtung der Rauschkarte wird deutlich, daß die

Spalte 47 einen im Mittel um 1 ADC (3 eV) höheren Rauschwert besitzt als die anderen Spalten des CCDs. Die Spalten 31 und 32 zeigen kein auffälliges Verhalten. Noch deutlicher wird dieser Effekt an der Spaltenverteilung der Rauschkarte. Zur Bestimmung der Spaltenverteilung wurden die Rauschwerte jeweils einer Spalte über alle 200 Zeilen gemittelt und gegen die Spaltennummer aufgetragen. Es ergibt sich so für jede Spalte ein Rauschmittelwert aus 200 Rauschwerten. Diese Art der Darstellung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit immer als Spaltenspektrum oder Spaltenverteilung bezeichnet werden und auch an anderen Stellen häufig benutzt.

**Offset**

Die Offsetwerte der Übergänge entsprechen im Mittel denen des restlichen CCDs. Ein Unterschied zu den "normalen" Spalten zeigt sich erst bei einer CAMEX- und Common-Mode bereinigten Offsettabelle (siehe 7.1). Die dargestellte CAMEX- und Common Mode korrigierte Offsetkarte zeigt den reinen Pixel-Offset des CCDs. Die CAMEX und Common Mode-Anteile wurden dabei herauskorrigiert. Da der Pixel-Offset den geringsten Anteil zum Gesamtoffset beiträgt, sind die Werte sehr klein und schwanken nur zwischen -2 und 2 ADC. Dementsprechend liegt auch die Abweichung der Spalte 31 vom mittleren Offset nur bei ca. 1 ADC (3 eV) und kann in der Auswirkung auf das Energiespektrum vernachlässigt werden. Die Spalten 47-48 weichen nicht vom mittleren Offsetwert des CCDs ab.

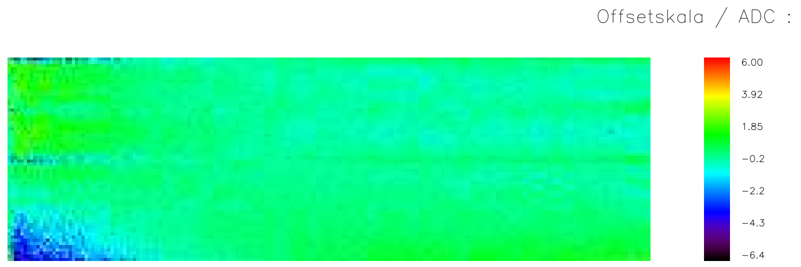



**Abb. 6.5:** Die Karte des Pixeloffsets.

### 6.3.2 Die Verstärkung (Gain)

Viel drastischer wirken sich die Übergänge in der Verstärkung der Kanäle aus. Hier zeigt sich, daß die Kanäle 47 und 48 und deren direkte Nachbarkanäle deutlich schlechtere Verstärkungseigenschaften haben als die anderen Spalten. Der Verstärkungsfaktor liegt mit 0.910 im Kanal 47 9.1 % unter dem Mittelwert von 1.005 des gesamten CCDs. Dieser Effekt läßt sich, wie später in 6.3.9 besprochen wird, auf abfließende Ladungen in der Halbleiterstruktur zurückführen. Dies führt dazu, daß in der Pixel-Ebene nur noch ein Teil der generierten Ladung ankommt und an der Anode detektiert werden kann. Der Ladungsverlust macht sich dann als Einbruch der Verstärkung bemerkbar.

### 6.3.3 Die Charge Transfer Efficiency (CTE)

Ausgehend von der Struktur des CCD-Übergangs würde man eigentlich erwarten, daß der Ladungstransport zumindest in Spalte 31 beeinträchtigt wird, da hier direkt die Pixelebene durch Halbleiterstrukturen unterbrochen wird. Außerdem liegt die Vermutung nahe, daß Ladungen beim Schiebevorgang aus den Pixelstrukturen des Kanals 31 abfließen können. Zur Bestimmung der CTE in den entsprechenden Spalten, wurden die jeweils anderen

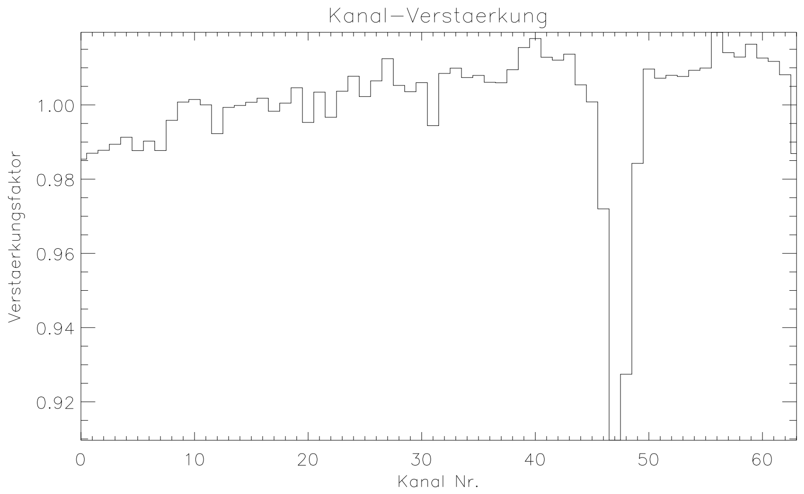



**Abb. 6.6:** Die Verstärkungskarte des CCDs C8_1_10.

Spalten als "BAD" markiert. Dadurch war gewährleistet, daß nur noch Ereignisse aus den Spalten, die gerade untersucht werden sollten, detektiert wurden. Zusätzlich wirkt sich diese Vorgehensweise positiv auf die Meßzeit aus, da nur noch die Ereignisse ausgewertet werden die auch wirklich von Interesse sind.

Zur Berechnung der CTE wurde die Lage der Mn-$K_\alpha$-Linie in Abhängigkeit von der Zeilennummer bestimmt. Daraus ergeben sich die in Abbildung 6.7 dargestellten Grafiken. An den Signalverlauf werden anschließend mehrere Funktionen angepaßt, aus denen sich die CTE ergibt. In den Grafiken sind die Anpassungen in Form von drei verschiedenen farbig gezeichneter Funktionen zu sehen. Dies sind die linear genäherte CTE-Funktion (6.2) mit festem Startwert und die exakte CTE-Funktion mit und ohne Wichtung (6.1).

$$f(x) = a \cdot CTE^x \tag{6.1}$$

$$f(x) = a + m \cdot x \tag{6.2}$$

Bei der gewichteten CTE-Funktion werden höherwertige Zeilen mit dem Faktor 1/Zeile weniger stark gewichtet als die Anfangszeilen des CCDs. Diese Vorgehensweise ist deshalb sinnvoll, weil die CTE in den hinteren Zeilen einbricht.

Die Messungen der CTE zeigen, daß die CTE bei dem CCD C8_1_10 in allen 3 Teilbereichen des CCDs bei 99,97 % liegt. Die Unterschiede in der CTE, was die Spalten der Übergänge betrifft, liegen nur im Promillbereich. Dies bedeutet, daß sich weder der CCD- noch der Rückkontaktübergang negativ auf den Ladungstransport auswirken.

### 6.3.4 Die Quantenausbeute in den Übergängen

Als erste Eigenschaft, die von der Einstrahlung von Photonen abhängt, soll die Quantenausbeute oder auch "Quantum-Efficiency (QE)" untersucht werden. Die QE sagt aus, wie viele der einfallenden Photonen vom Detektor tatsächlich registriert werden. Da zu den Messungen dieser Arbeit kein Referenz-Detektor mit bekannter absoluter QE vorhanden war, kann keine Aussage über die absolute QE gemacht werden. Vielmehr kann die QE der Übergänge nur relativ zum restlichen Detektor bestimmt werden.

Zu diesem Zweck wurde eine Trefferkarte oder auch Intensitätsbild des CCDs C8_1_10 erstellt. Das CCD wurde dazu mit einer Energie von 5.897 keV, der Mn $K_\alpha$-Linie, bestrahlt und die Trefferzahl in den einzelnen Pixel registriert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.8 zu sehen. Bei der Auswertung der Daten wurde die stark unterschiedliche Verstärkung der

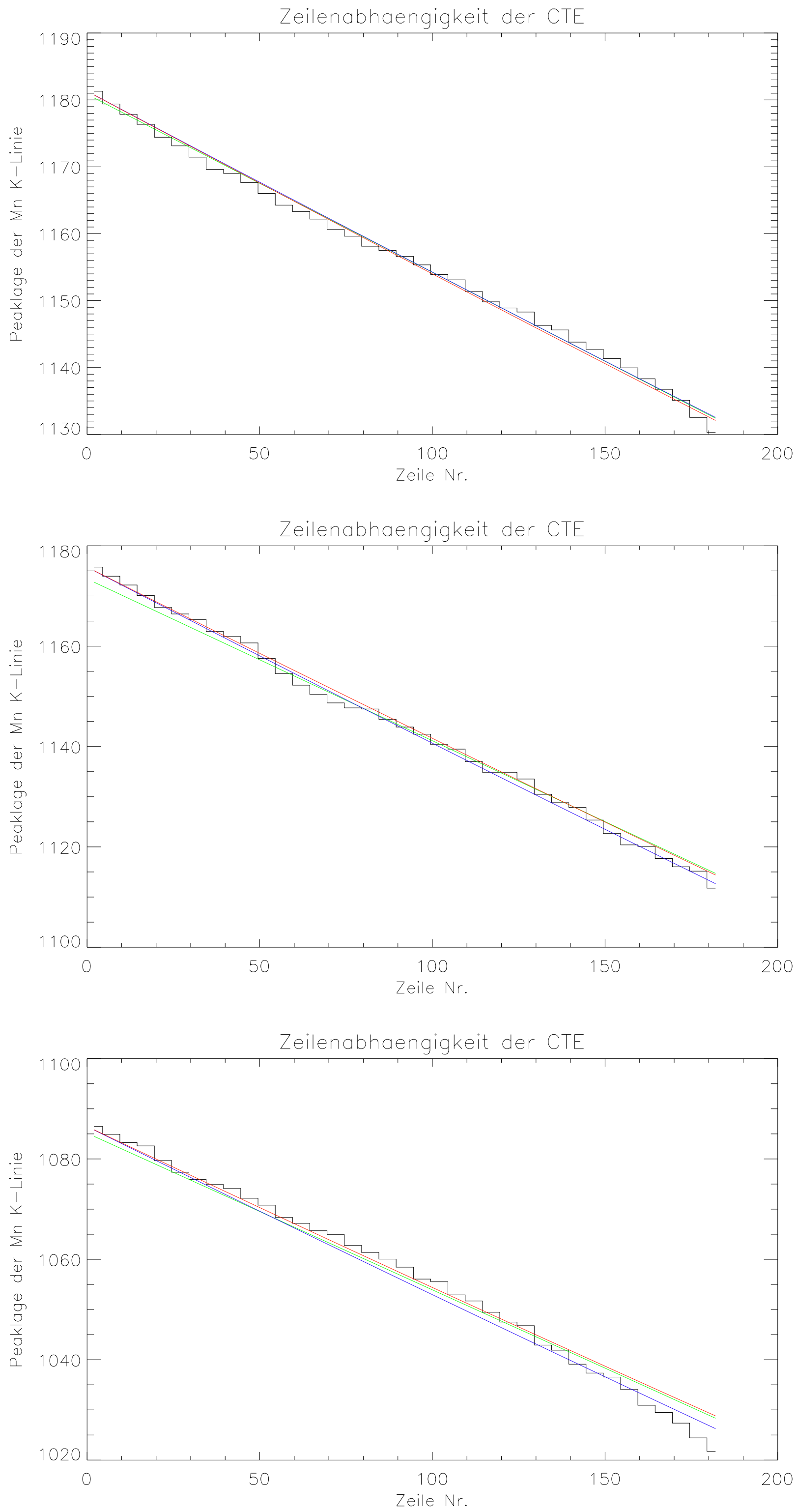



**Abb. 6.7:** Die Diagramme stellen die Lage des Mn-$K_\alpha$-Linie in Abhängigkeit von der Zeilennummer dar. Aus den Funktionen, die an den Signalverlauf gefittet wurden, ergibt sich direkt die CTE. Die obere Grafik gibt den Verlauf der CTE im gesamten CCD-Bereich wieder. Die beiden unteren Grafiken zeigen den CTE-Verlauf in der Spalte 31 und den Spalten 47-48 (von oben nach unten). Die aus den Fits bestimmten CTE-Werte sind in Tabelle 6.2 zusammengefaßt.

**Relative Quantenausbeute**

| Spalten | Trefferzahl |
|---|---|
| 0 | 72 % |
| 31-32 | 79 % |
| 47-48 | 55 % |
| 63 | 69 % |

**Tab. 6.1:** Trefferanzahl in den einzelnen Spalten in Prozenten der mittleren Trefferzahl aus allen Spalten des CCDs. Ausgewertet wurden alle Ereignisse (Single- und Split-Events) der Mn $K_\alpha$-Linie.

64 Kanäle schon berücksichtigt und entsprechend korrigiert. Eine zusätzliche Korrektur hinsichtlich Single- oder Split-Events fand nicht statt. Auf den ersten Blick fallen die beiden Übergänge in Spalte 31 und in den Spalten 47-48 auf. Relativ zur mittleren Trefferzahl im ganzen CCD sind die prozentualen Werte der Trefferzahlen dieser Spalten in Tabelle 6.1 wiedergegeben. Besonders deutlich ist die schlechte QE im Rückkontakt Übergang, wo nur noch 55 % der einfallenden Photonen detektiert werden. Die Randspalten des CCDs zeigen eine ähnliche Charakteristik wie der CCD-Übergang. In beiden Fällen gehen etwa 30 % der Photonen verloren.

### 6.3.5 Das Splitverhalten

Der Algorithmus zur Erkennung von Split Events arbeitet nach dem folgenden Prinzip:

> Wird ein Ereignis in einem Pixel detektiert, dann werden von der Auswertesoftware die Nachbarpixel dieses Pixels abgesucht. Wurde im gleichen Auslesezyklus auch ein Treffer in einem der Nachbarpixel registriert, dann wird das Ereignis als Split Event markiert. Die Energien der Ereignisse können anschließend paarweise aufaddiert und als Spektrum ausgegeben werden.

Diese Vorgehensweise erlaubt allerdings nur eine Korrektur von Zweier-Split Events, wo eine Aufteilung der Ladung auf zwei Pixel erfolgt. Für die Randspalten eines CCDs ist eine vollständige Split Event-Korrektur nicht möglich, da am Rand in einer Richtung keine direkten Nachbarpixel vorhanden sind. In diesen Spalten werden von der Software also weniger Split Events erkannt.

**Relative Trefferzahl Single Events**

| Spalten | Trefferzahl |
|---|---|
| 47-48 | 59.8 % |

**Relative Trefferzahl Split Events**

| Spalten | Trefferzahl |
|---|---|
| 0 | 64.3 % |
| 31-32 | 64.4 % |
| 47-48 | 78.8 % |
| 63 | 64.5 % |

**Abb. 6.9:** Trefferzahlen der Single und Split Events der einzelnen Spalten in Prozenten der mittleren Trefferzahl über das ganze CCD.

Das Ergebnis der Split Event-Korrektur zeigen die Trefferkarten des CCDs in Abbildung 6.10. Hier sind jeweils nur die Single Events bzw. Split Events einer Messung eingetragen. Unter den Trefferkarten sind die zugehörigen Spaltenverteilungen wiedergegeben, die die Effekte in den Spalten deutlicher hervorheben. Die fehlerhafte Korrektur in den Rand-

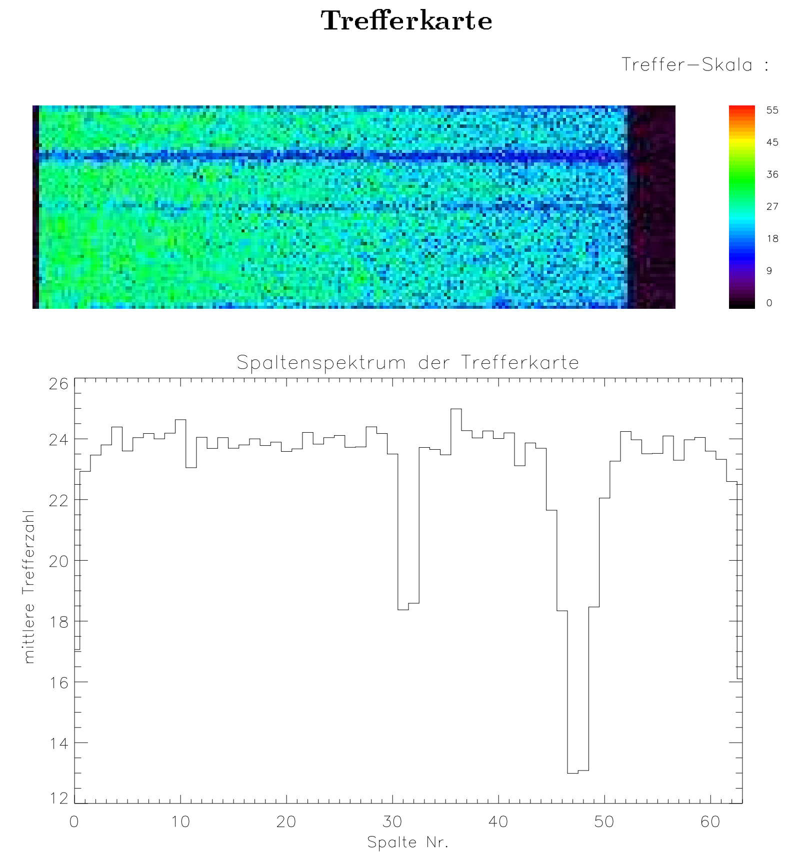



**Abb. 6.8:** Trefferkarte des CCDs C8_1_10 bei einer Energie von 5.897 keV. Ausgewertet wurden alle Ereignisse (Single- und Split-Events) der Mn $K_\alpha$-Linie.

spalten wird an Hand der Spalten 0 und 63 deutlich. Die Trefferzahl der Splits ist hier aus dem oben angeführten Grund wesentlich geringer als im Mittel über das ganze CCD. Ein ähnliches Verhalten zeigt der CCD-Übergang in Spalte 31, auch hier ist die Anzahl der gesplitteten Ereignisse viel geringer und entspricht in etwa der mittleren Trefferzahl der Spalten 0 und 63. In der Single Event Verteilung kann für die Kanäle 31-32 keine signifikante Veränderung festgestellt werden.

In den Kanälen 47-48 tritt allerdings eine Häufung von Split Events auf. Obwohl absolut weniger Split Events als im CCD-Mittel auftreten, finden im Verhältnis zu den Single Events in diesen Kanälen mehr Split Events statt. Denn in diesem Fall muß beachtet werden, daß die Splitwahrrscheinlichkeit wegen der geringeren QE in Kanal 47 und 48 höher ist.

### 6.3.6 Qualitative und quantitative Auswirkungen auf das Energiespektrum

Eine der wichtigsten Fragen, die sich im Zusammenhang mit den Übergängen stellt, ist, welche Auswirkungen die bisher erwähnten Effekte auf das Energiespektrum und die Energieauflösung haben. Dazu wurden die Spektren der Mn-$K_\alpha$- und $K_\beta$-Linien in den verschiedenen Spalten untersucht. Die Spektren der Übergänge wurden verglichen mit einem Spektrum aus zwei "normalen" Spalten. In den aufgeführten Beispielen sind dies die willkürlich gewählten Spalten 5-6. Die dargestellten Spektren wurden aus einer Messung gewonnen, d.h. die Trefferzahlen in den Linien können direkt miteinander verglichen werden. Zur Bestimmung der Linienbreiten und Bewertung der Energieauflösung, die in Tabelle 6.2

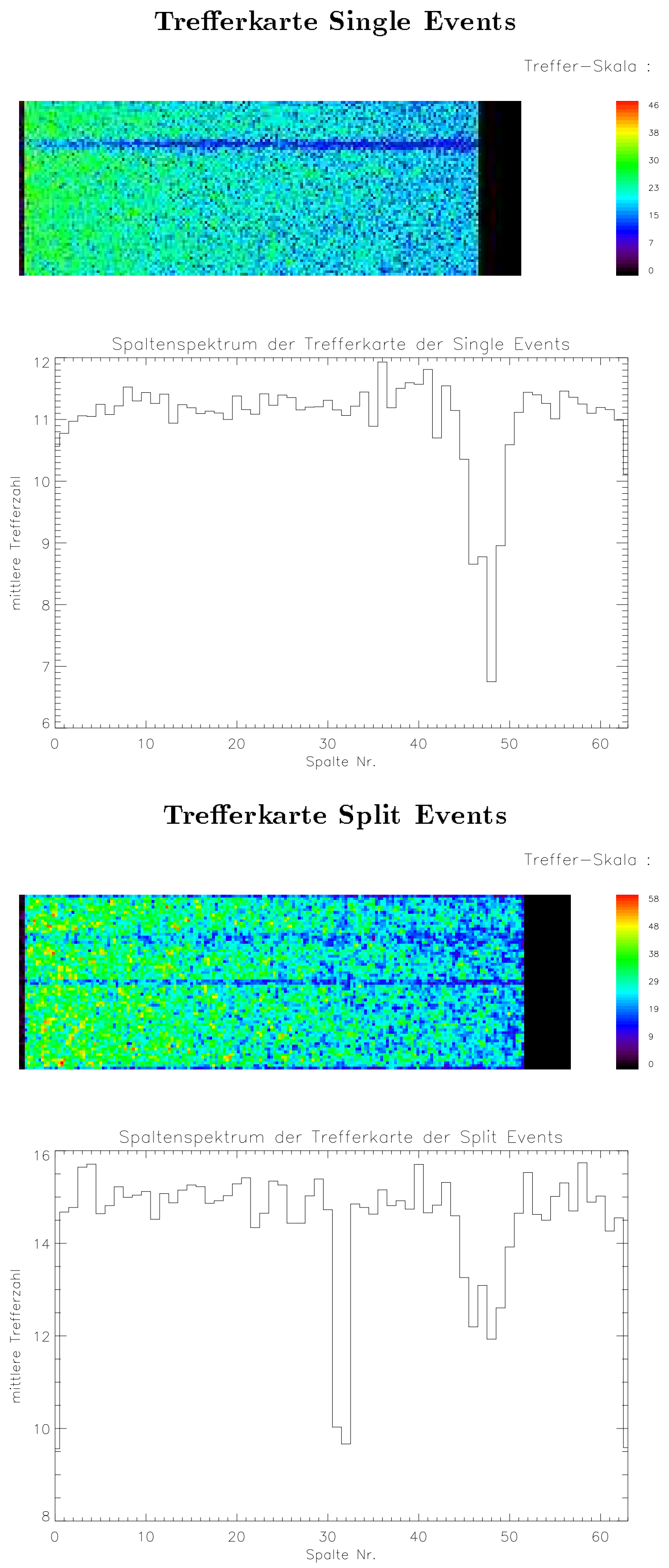



**Abb. 6.10:** Trefferkarten und Spaltenverteilungen zum Splitverhalten: Die oberen beiden Bilder zeigen die Trefferkarte und Spaltenverteilung der Single Events. Auf den unteren Abbildungen ist die Trefferkarte und Spaltenverteilung der Split Events dargestellt.

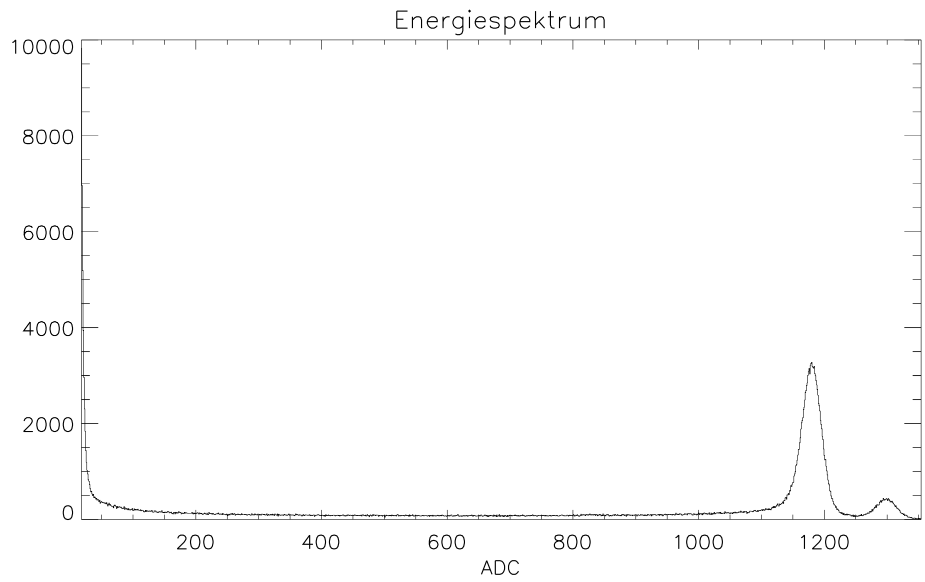



**Abb. 6.11:** Spektrum aus Signalen des ganzen CCDs, mit Rauschpeak, Mn-$K_\alpha$- und $K_\beta$-Linie.

angegeben sind, wurden Spektren wesentlich besserer Statistik verwendet. Diese Spektren wurden aus Datensätzen erstellt, bei denen nur die wichtigen Spalten 31-32 bzw. 47-48 als "GOOD" markiert waren. Dadurch wurden auch nur Ereignisse aus diesen Spalten ausgelesen.

Ein Spektrum vom ganzen CCD zeigt Abbildung 6.11. Deutlich sind von links nach rechts die Rausch-, Mn-$K_\alpha$und $K_\beta$-Peaks zu sehen. Ebenfalls erkennbar ist die typische "Badewannenform" des Spektrums, die zwischen dem Rausch-Peak und den Mn-Linien auftritt. Der Ursprung der "Badewannenform" liegt, wie schon früher erwähnt wurde, in der Aufspaltung der deponierten Ladung auf mehrere Pixel durch Split Events. Die Fe-$K_\alpha$-Linie hat bei diesem Spektrum eine Breite von $\sigma$ = 13.2 ADC, dies entspricht einer FWHM von 150 eV.

**Zusammenfassung der Ergebnisse**

| Spalte | 47 | 48 | 47-48 | 31 | 32 | CCD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CTE | 0.99969 | 0.99969 | 0.99970 | 0.99971 | 0.99978 | 0.99977 |
| $\frac{E}{\Delta E}$ | ——— | ——— | minimal schlechter | minimal schlechter | ——— ——— | ——— |
| Rauschen in ADC | 5.763 | 5.373 | 5.568 | 4.580 | 4.580 | 4.580 |
| $\sigma_{K_\alpha}$ in ADC | 19.54 | 19.04 | 19.10 | 17.61 | 15.78 | 15.74 |
| Gain | 0.907 | 0.926 | 0.916 | 0.995 | 1.009 | 1.004 |

**Tab. 6.2:** Bei allen Messungen wurden die Zeilen 182-199 ausgeschlossen, weil sie durch einen Defekt im CCD C8_1_10 schlechter schieben. Die Spalte "CCD" beschreibt das Verhalten der Spalten 0-63 ohne die Spalten 31-32 und 47-48.

Die Auswirkungen auf das Spektrum in den entsprechenden Spalten der Übergänge wird in Abbildung 6.17 sichtbar. Ein Vergleich des Spektrums aus dem Rückkontaktübergang mit dem Spektrum aus Spalte 5-6 zeigt, daß die Trefferzahl im Zentrum der Linie des

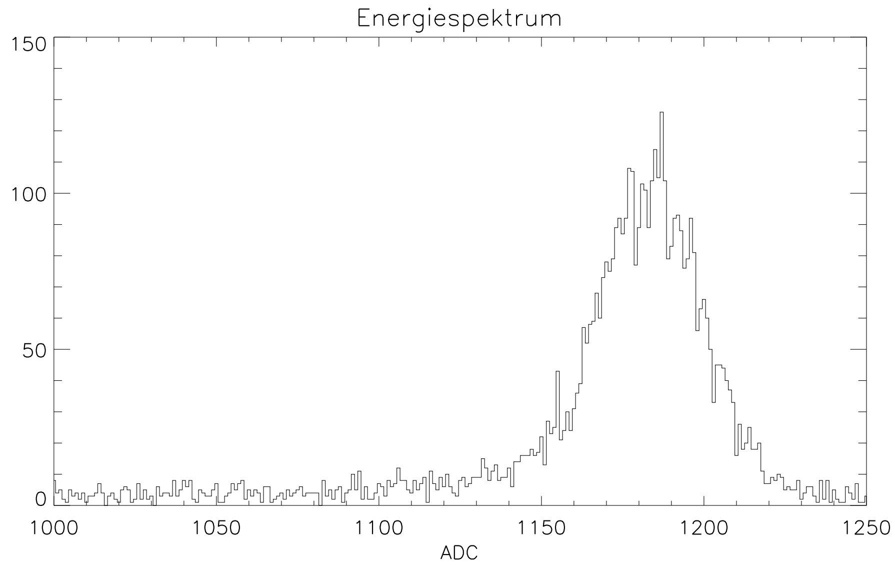



**Abb. 6.12:** Vergleichsspektrum aus zwei beliebigen Spalten, in diesem Falle aus den Spalten 5-6.

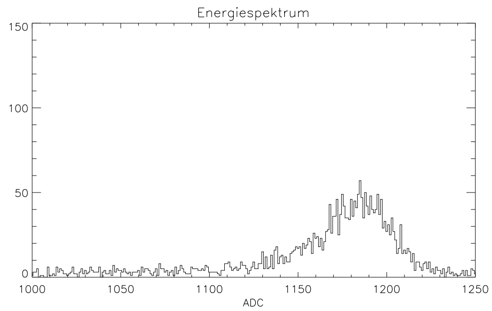



**Abb. 6.13:** Spektrum aus den Ereignissen der Spalten 47-48 (Rückkontakt-Übergang).

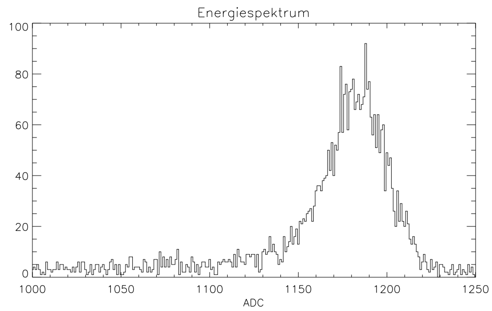



**Abb. 6.14:** Spektrum aus den Ereignissen der Spalten 31-32 (CCD-Übergang).

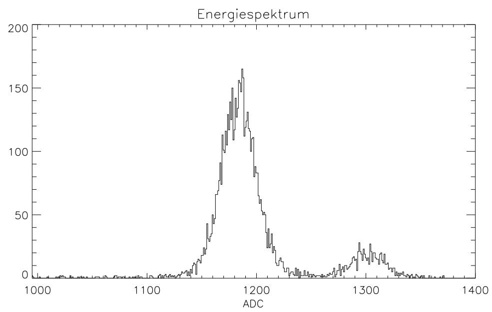



**Abb. 6.15:** Spektrum der Single Events aus den Spalten 5-6.

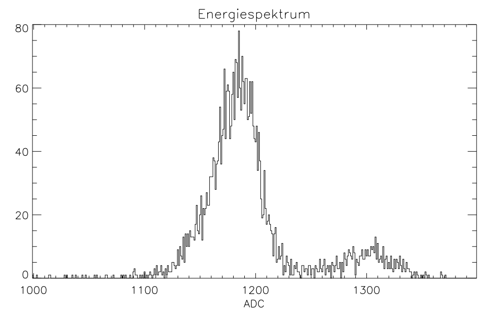



**Abb. 6.16:** Spektrum der Single Events aus den Spalten 47-48.

**Abb. 6.17:**

Spektrums aus Spalte 47-48 wesentlich geringer ist. Dies wird allerdings nach den Erkenntnissen über die QE in 6.3.4 auch erwartet. Hinzu kommt, daß die Linie mit 19.10 ADC um 4 ADC breiter ist als die im Vergleichsspektrum. Die Ursache dafür ist u.a. die größere Anzahl von Split Events in diesen Spalten. Sie erzeugen eine niederenergetische Flanke der $K_\alpha$-Linie, die im Spektrum auch deutlich zu sehen ist. In den Spalten 47-48 ist diese Split-Flanke viel ausgeprägter als im Vergleichsspektrum, was auf Grund der Skalierung des Spektrums aber nicht deutlich zur Geltung kommt.

Das Spektrum aus dem CCD-Übergang zeigt, daß, abgesehen von der geringeren Trefferzahl im Zentrum der Linie, keine nennenswerten Unterschiede zum Vergleichsspektrum auftreten. Diese Abnahme der Trefferzahl ist wie beim Rückkontaktübergang durch die schlechtere QE zu erklären.

Daß die niederenergetische Flanke im Spektrum der Spalten 47-48 nicht ausschließlich von Split Events herrührt, wird an den Single Event Spektren der Spalten 5-6 und 47-48 deutlich. Diese Spektren wurden einer Split Event Korrektur unterzogen, wobei die Split Events paarweise aufaddiert werden. Wenn als Ursache der niederenergetischen Flanke nur die Split Events in Frage kämen, dann müßte nach der Korrektur die Flanke verschwunden sein, wie im Single Event Spektrum aus Spalte 5-6 zu sehen ist. Das Spektrum aus Spalte 47-48 zeigt aber immer noch eine kleine Asymmetrie auf der niederenergetischen Seite, die durch die Split Events nicht erklärt werden kann. Mögliche Ursachen für den hier auftretenden Effekt werden im Abschnitt 6.3.9 besprochen. Eine quantitative Auswertung der Spektren ist in der Tabelle 6.2 zusammengefaßt. Die dort angegebenen Werte unterstreichen die hier beschriebenen Effekte.

### 6.3.7 Die Ortsauflösung unter dem Rückkontaktschnitt

Zur Untersuchung der Ortsauflösung wurde die in Abbildung 6.18 dargestellte Blende verwendet. Die Breite der Spalte auf der Blende beträgt ungefähr 120 $\mu$m und die Blende befand sich beim Betrieb des CCDs etwa 1 cm vor dem CCD (siehe Abbildung 6.1). Quantitativ kann mit diesem Aufbau keine Aussage über die Ortsauflösung gemacht

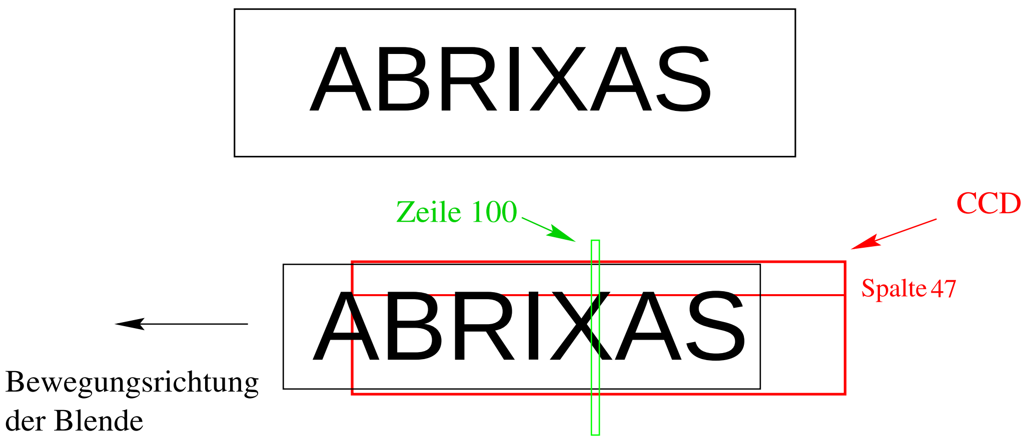



**Abb. 6.18:** Oben ist die Blende mit dem Schriftzug "ABRIXAS" dargestellt. Im unteren Teil des Bildes wird die Bewegung der Blende (schwarz) über das CCD (rot) verdeutlicht. Für die Datenauswertung wird nur die grün eingezeichnete Zeile betrachtet, die unter dem Buchstaben "X" zu liegen kommt.

werden, allerdings konnte ein qualitativer Vergleich mit den Pixel anderer Spalten erfolgen, in der Art, daß eine Änderung der Ortsauflösung im Bereich der Übergänge festgestellt werden kann. Dazu wurde die Blende in 10 $\mu$m Schritten vor dem CCD vorbei bewegt (siehe Abbildung 6.18 unten). Wird dann die Spaltenverteilung nur einer einzelnen Zeile

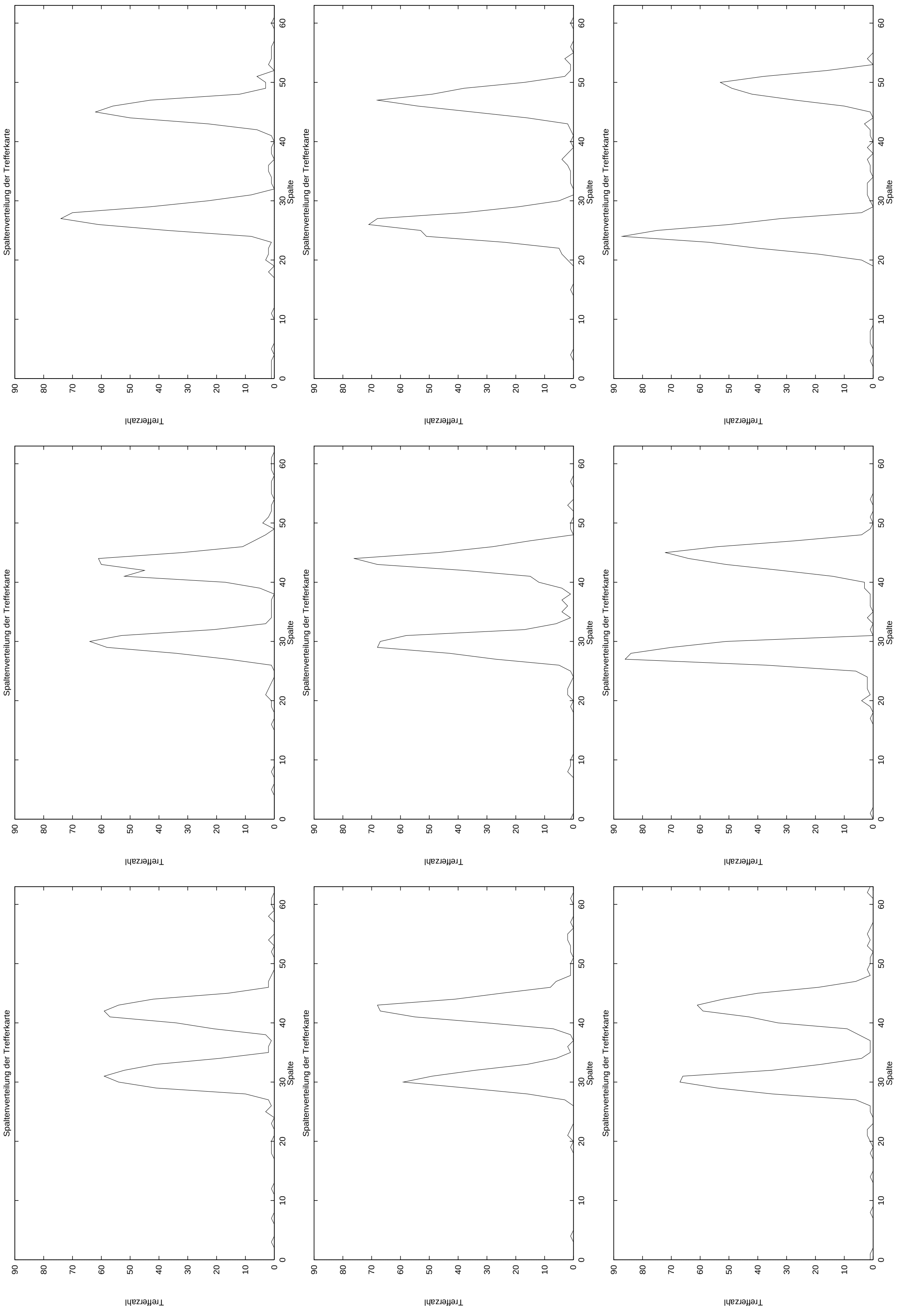



**Abb. 6.19:** Von links Unten nach rechts Oben wird in den Darstellungen deutlich, wie die Peaks maximaler Intensität auseinander wandern und dabei die Spalten 31-32 und 47-48 überstreichen. In der Abbildung ist nur ein kleiner Querschnitt aus 32 Einzelplots wiedergegeben, die die Bewegung der Intensitätsmaxima verdeutlichen sollen.

betrachtet, z.B. der in der Abbildung grün markierten Zeile 100, dann ergibt sich eines der in 6.19 dargestellte Bilder. Die zwei Maxima in den Trefferverteilungen entsprechen den in der Spalte 100 belichteten Stellen aus den Schenkeln des Buchstaben "X". Wird nun die Blende in Pfeilrichtung bewegt, dann wandern die Stellen maximaler Intensität innerhalb der Zeile 100 langsam auseinander und überstreichen die Spalten 47 und 31 senkrecht zur Bewegungsrichtung der Blende.

Bei einer signifikanten Änderung der Ortsauflösung im Bereich der Übergänge würde man eine Deformation der Peaks in Form einer Verbreiterung oder Verschmälerung erwarten. Dies ist aus den Messungen aber nicht ersichtlich. Die kleinen Abweichungen von einer symmetrischen Form der Peaks in den Bildern sind auf statistische Effekte zurückzuführen. Aus diesen Gründen kann angenommen werden, daß eine signifikante Verschlechterung der Ortsauflösung in den Übergängen der Spalten 31-32 und 47-48 in einem Bereich von $\pm 10\mu$m nicht auftritt.

### 6.3.8 Energieabhängigkeit der QE

Messungen bei verschiedenen Energien konnten in Tübingen nicht durchgeführt werden. Zur Untersuchung der Energiebhängigkeit der QE wurden Daten von Testmessungen an der Zeta-Anlage des MPE in Garching verwendet. Dort wurde ein ganzer Quadrant eines CCD-Arrays betrieben und bei verschiedenen Energien Daten aufgenommen. Dieses CCD-Array konnte allerdings nur Daten aus den Übergängen zwischen zwei CCDs liefern, da nur ein Quadrant auf dem CCD bestückt war. Die Tabelle 6.3 zeigt die prozentuale QE der Übergänge zwischen zwei CCDs, nämlich dem Übergang zwischen CCD0 und CCD1. Als Bezugswert wurde wieder die mittlere Trefferzahl aus allen 64 Spalten gewählt. Relativ dazu ergibt sich dann die mittlere Trefferzahl der Randspalte 0 in Prozenten. Die Messergebnisse zeigen deutlich eine Zunnahme der QE zu höheren Energien hin.

**Relative Quantenausbeute in der Randspalte 0 des CCD0**

| Linie | Treffer |
|---|---|
| Fe-$K_\alpha$5.894 KeV | 83 % |
| Ti-$K_\alpha$4.507 KeV | 34 % |
| Al-$K_\alpha$1.487 KeV | 31.8 % |

**Tab. 6.3:** Die QE im Übergang zwischen dem CCD0 und CCD1 eines CCD-Quadranten relativ zur mittleren Trefferzahl aus allen Spalten des CCDs.

### 6.3.9 Der Versuch einer möglichen Erklärung der Effekte

#### Der Rückkontakt-Übergang

Der Aluminium-Rückkontakt des CCDs C8_1_10 war zu den Messungen dieser Arbeit nicht gebondet, d.h. er war nicht leitend mit dem Rückkontakt des restlichen CCDs verbunden. Dies führt dazu, daß sich der Al-Rückkontakt nicht auf einem definierten Potential befindet.

Im normalen Betrieb ist der Rückkontakt des CCDs stark negativ vorgespannt. Beim Betrieb des CCDs C8_1_10 lag die Rückkontaktspannung bei -150 V. Betrachtet man einen Querschnitt durch das CCD, der in Abbildung 6.3 mit "Schnitt A" gekennzeichnet ist, dann bedeutet dies, daß ein Potentialgefälle von der Rückseite des CCDs zur Vorderseite entsteht. In diesem Potentialfeld bewegen sich, die durch Photonen generierten Elektronen,

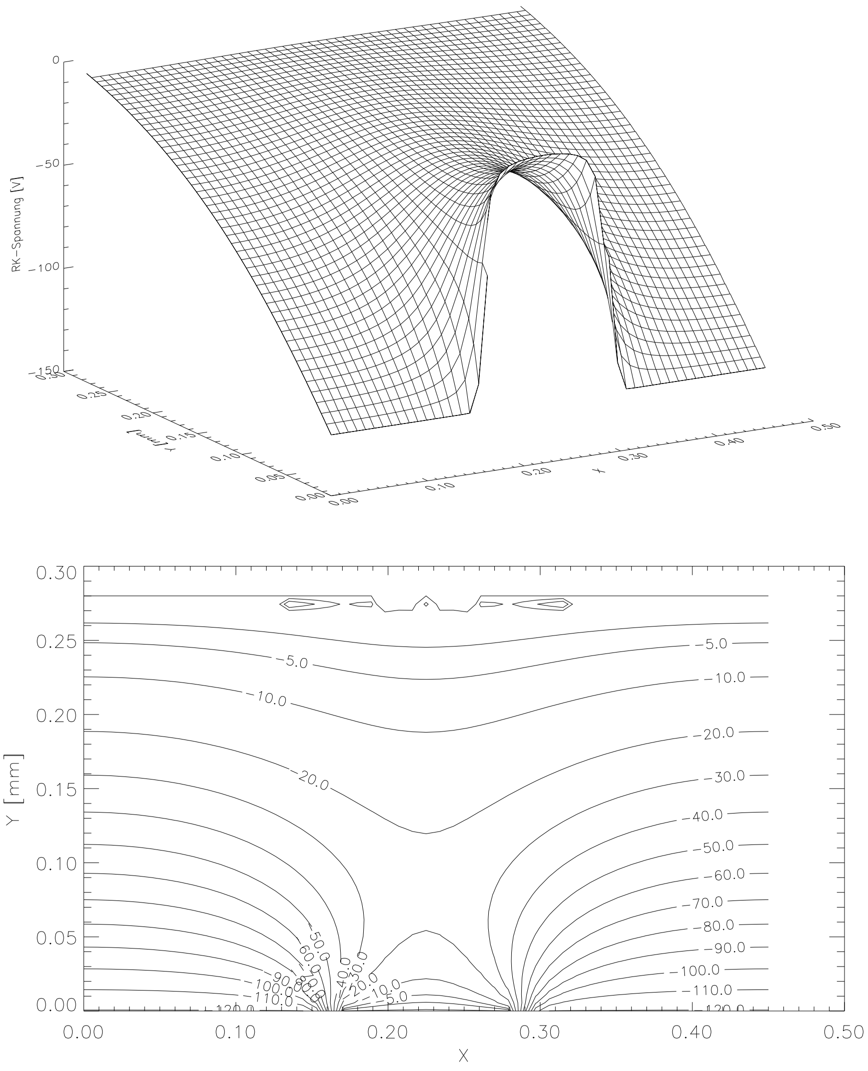



**Abb. 6.20:** Potentialverlauf unter dem Rückkontakt bei einer Rückkontakt Spannung $V_{rk}$= 0 V. Der Al-Streifen befindet sich bei den Koordinaten y=0, x=0.20-0.30. Oben: dreidimensionale Darstellung des Spannungsverlaufs unter dem Al-Streifen, unten: äquipotential Darstellung.

bis zum Potentialminimum direkt unter der Pixel-Ebene, wo sie gesammelt und zur Anode geschoben werden. Dieses homogene Potentialfeld wird unter dem Aluminiumstreifen im Rückkontaktschnitt gestört.

Der Aluminiumstreifen wird nach dem Einschaltvorgang des CCDs relativ schnell ein bisher noch nicht bekanntes Potential annehmen, das zwischen der Rückkontaktspannung von -150 V und dem Potentialminimum von nahezu 0 V unterhalb der Pixelebene liegt. Eine Simulation der Potentialverhältnisse für zwei stark vereinfachte Extremfälle der Spannung am Al-Streifen zeigen die Abbildungen 6.20 und 6.21. Die Daten für diese Simulationen wurden für diese Arbeit freundlicherweise von L. Strüder und M. Popp vom MPI-Halbleiterlabor in Pasing zur Verfügung gestellt.

Unter der Annahme, daß der Aluminiumstreifen auf einem Potential von 0 V liegt, ergibt sich der Potentialverlauf wie in Bild 6.20 dargestellt. Für ein Potential von -120 V entsteht der in 6.21 gezeigt Verlauf. Die beiden Darstellungen in Abbildung 6.20 zeigen, daß unterhalb des Aluminiumkontakts eine positive Potentialmulde entsteht, die für den Fall

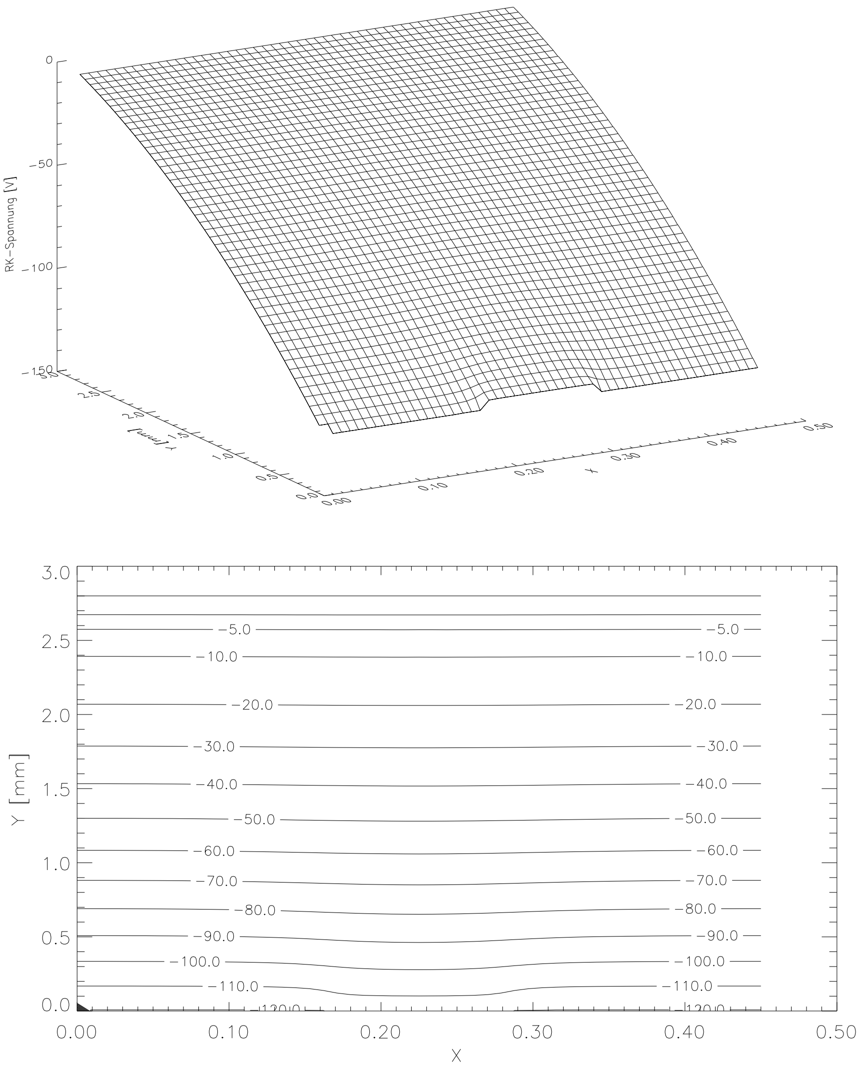



**Abb. 6.21:** Potentialverlauf unter dem Rückkontakt bei einer Rückkontakt Spannung $V_{rk}$= 120 V. Oben: dreidimensionaler Plot, unten: äquipotential Darstellung.

von $V_{rk}$= 0 V bis ca. 50 $\mu$m in das n-Substrat des CCDs hineinreicht. Dies bedeutet, daß Elektronen, die in Tiefen bis zu 50 $\mu$m generiert werden in den Bereich der Potentialmulde abfließen können und nicht zur Pixelebene gelangen. Elektronen, die im Bereich nahe des Rückkontakts generiert wurden, fließen dabei vollständig in den Bereich unterhalb des Aluminiumstreifens ab. Diese Elektronen gehen verloren, was zu einer niedrigeren QE führt.

Bei einer Spannung $V_{rk}$= 120 V ist der Potentialverlauf glatter (siehe Abbildung 6.21) und kommt dem homogenen Potentialverlauf in den übrigen Bereichen des CCDs sehr nahe. Die tatsächlichen Potentialverhältnisse unter dem Al-Streifen werden zwischen diesen beiden idealisierten Modellen liegen.

Die schlechtere QE in diesem Übergang kann nicht durch Absorptionseffekte in der Al-Schicht erklärt werden. Die Schichtdicke des Al-Streifens beträgt ca. 900 nm, bei einer Photonenenergie von 5.9 keV liegen die Absorptionseffekte in solch einer Schicht unterhalb 8 %.

In Abschnitt 6.3.6 wurde gezeigt, daß trotz einer Split Event Korrektur im Spektrum der Ereignisse aus den Spalten 47-48, die $K_\alpha$-Linie noch eine asymmetrische Flanke zu niedrigen Energien zeigt. Dieser Effekt kann durch Partial Events erzeugt werden. Unterhalb des Al-Streifens wird, wie oben erklärt wurde, eine positive Potentialmulde gebildet. Dies kann dazu führen, daß die Region unterhalb des Rückkontaktstreifens nicht mehr voll depletiert ist. Dadurch könnte ein den Partial Events ähnlicher Effekt entstehen, in der Art, daß ein Teil der generierten Elektronen rekombinieren kann und verloren geht. Die in der Pixel-Ebene ankommende Ladungsmenge ist dadurch kleiner, als die die der ursprünglichen Photonenenergie entsprechen würde. Diesem Ereignis wird also eine zu niedrige Energie zugewiesen.

Die Effekte im CCD-Übergang sind zur Zeit dieser Arbeit noch nicht vollständig verstanden. Vor allem die Verhältnisse im Halbleiter sind noch nicht geklärt und müssen noch besser untersucht werden [SP].

# Kapitel 7

# Die Offsetkorrektur

Wie in Abschnitt 4.2.1 erklärt wurde, ist der Offset eine additive Konstante , die vom CCD Signal abgezogen werden muß. Dieser Offset muß in Form einer Offsettabelle vor jeder zusammenhängenden Messung im Orbit neu berechnet werden. Die Offsettabelle dient dann als Grundlage zur Korrektur der aufgenommenen Signaldaten während der folgenden Messung.

Die Berechnung der Offsettabelle nimmt einen erheblichen Zeitraum in Anspruch, der von der wertvollen Beobachtungszeit verloren geht. Wie die Rechenzeit für die Offsettabelle möglichst klein gehalten werden kann, und ob die Offsettabelle sich eventuell auf den CAMEX-Anteil des Offsets reduzieren läßt, soll im anschließenden Kapitel diskutiert werden.

Mathematisch berechnet sich der Offset jedes einzelnen Pixels als dessen Energiemittelwert aus n Auslesezyklen, ohne daß das CCD bestrahlt wird.

$$O_{ij} = \sum_{k=0}^{n} \frac{E_{kij}}{n} = \bar{E}_{ij} \quad i = 0..63, j = 0..199 \tag{7.1}$$

Wobei die Zahl der Einlesezyklen aus statistischen Gründen möglichst hoch gewählt werden muß. Auf der anderen Seite wird man versuchen, n möglichst zu höheren Werten hin zu begrenzen, um die Rechenzeit zu verringern. Eine genauere Untersuchung des Offsets aus statistischer Sicht wurde schon in der Diplomarbeit von E. Bihler behandelt ([Bih96]). Er geht unter anderem auch auf das zeitliche Verhalten des Offsets näher ein. Als Ergebnis zeigt sich, daß mindestens n=100 Einlesezyklen erforderlich sind, um eine Verbreiterung der Linie durch statistische Schwankungen bei der Berechnung der Offsettabelle kleiner 3 eV zu erhalten.

## 7.1 Die Offsettabelle

### Die einzelnen Anteile am Gesamtoffset

Eine berechnete Offsettabelle des CCDs C8_1_10 ist in der Abbildung 7.1 ganz oben dargetellt. Diese Offsettabelle zeigt Substrukturen, die von den Verstärkungs- und Common Mode-Eigenschaften des CCDs und des CAMEX abhängen. Deutlich ist eine Spaltenstruktur zu erkennen, die von den unterschiedlichen Verstärkungskennlinien der einzelnen der Kanäle herrührt. Diese Struktur, die durch den CAMEX und die First-FETs auf dem CCD erzeugt wird, wird im weiteren Verlauf des Textes als CAMEX-Struktur bezeichnet werden. In Zeilenrichtung ist die Comon Mode-Struktur der Zeilen noch schwach zu sehen.

Diese Unterstrukturen der Offsettabelle lassen sich einzeln nachträglich durch eine Softwarekorrektur separieren. Werden die Offsetwerte jeder Spalte über die 200 Zeilen gemittelt

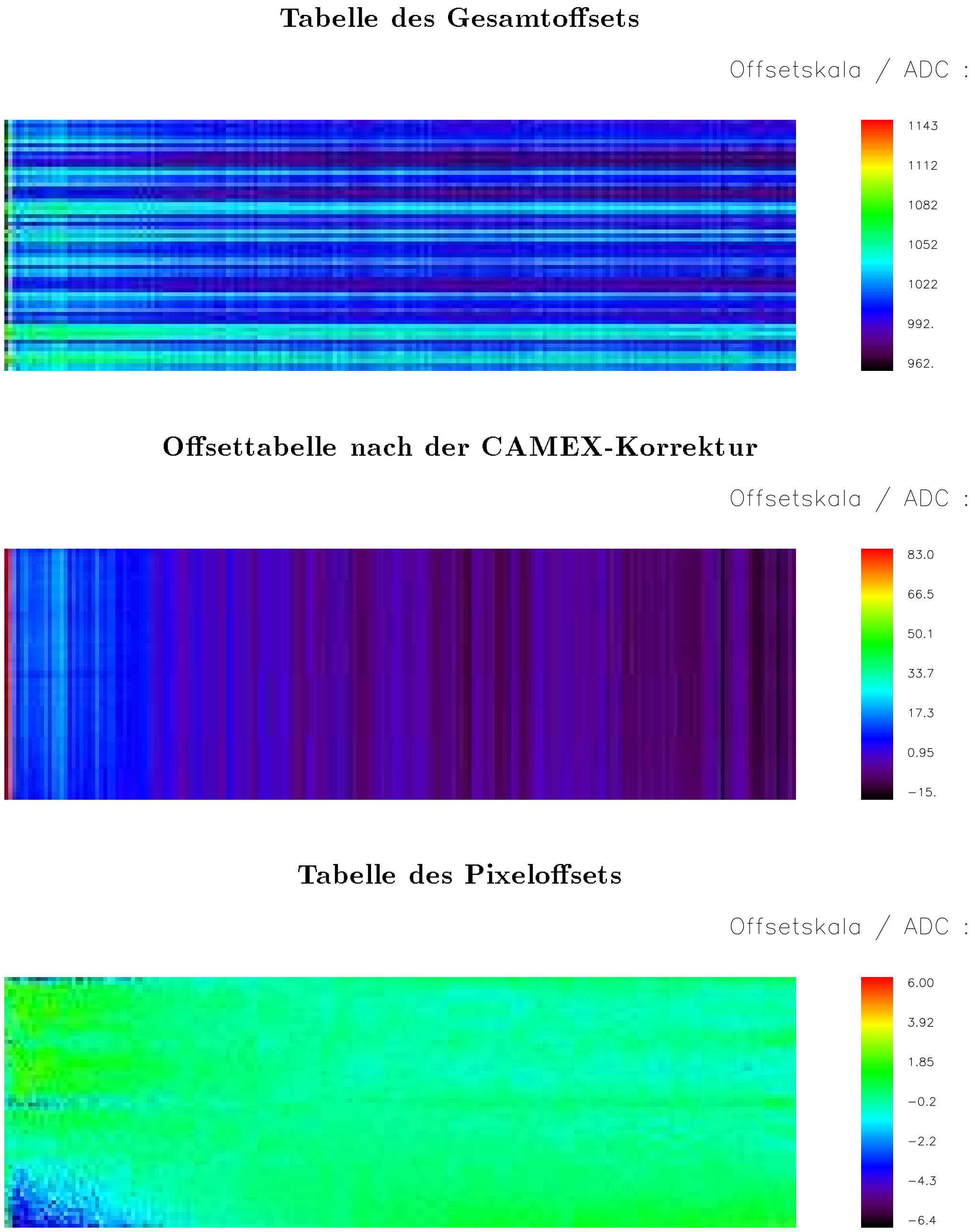
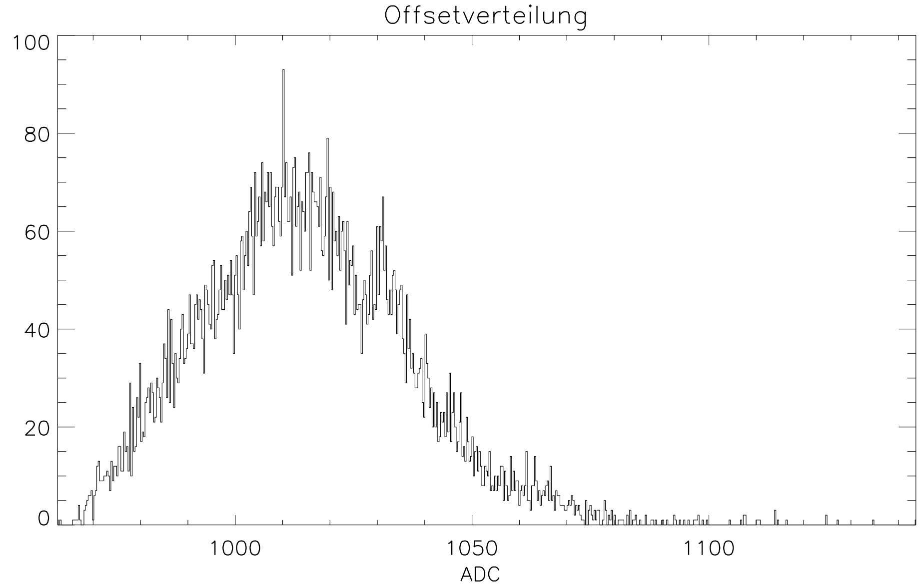


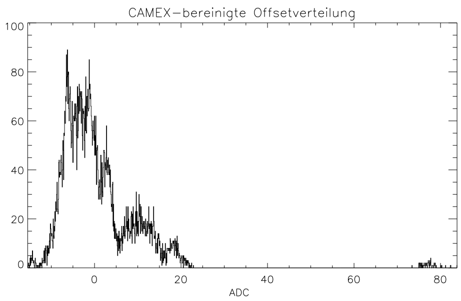

**Abb. 7.1:** Die verschiedenen Offsetanteile am Gesamtoffset.

und von der Offsettabelle subtrahiert, dann ergibt sich das zweite Bild der Abbildung 7.1. Dieses Bild zeigt die Offsettabelle nach dieser sogenannten CAMEX-Korrektur. Anschließend an die erste Korrektur wurde eine zweite durchgeführt. Dazu wurde entlang der Zeilen über die 64 Spalten gemittelt und anschließend dieser Mittelwert von allen Pixel der Zeile subtrahiert. Als Ergebnis erhält man den eigentlichen Pixeloffset des CCDs, ohne die Anteile der elektronischen Komponenten des CAMEX und der FIRST-FETs. In dieser Offsettabelle wird auch die Auswirkung des Übergangs in Spalte 31 sichtbar. Die Werte des Pixeloffsets liegen zwischen -2 und 2 ADC. Die negativen Werte entstehen durch die Subtraktion der Mittelwerte aus den Spalten und Zeilen.

**Offsetverteilung des Gesamtoffsets**




**CAMEX-korrigiert**




**Pixel-Offsetverteilung**

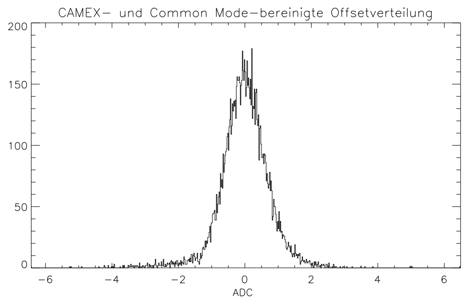



**Abb. 7.2:** Die Verteilungen der verschiedenen Offsetanteile.

Die Verteilungen der Offsetanteile sind in den Grafiken der Abbildung 7.2 wiedergegeben. Zur Bestimmung des Zentrums der Offsetverteilungen und der Breite der einzelnen Anteile wurde an die Verteilungen des Pixeloffsets und des Gesamtoffsets eine Gaußkurve angepaßt. Daraus ergibt sich, daß der Gesamtoffset bei 1012,1 ADC liegt und eine Breite von $\sigma = 22.4$ ADC hat. Der CAMEX-korrigierte Offset liegt bei 0 ADC und schwankt zwischen -15 und 20 ADC. Der Verteilung der Pixeloffsetwerte ist um 0 zentriert und hat nur noch eine Breite von $\sigma = 0.57$ ADC. Die Offsetverteilungen zeigen deutlich, daß die Struktur des Offsets durch die CAMEX-Struktur der einzelnen Kanäle dominiert ist. Die Common Mode Struktur ist weitgehend durch die Mittelung bei der Offsetberechnung verschwunden. Der Pixel-Offset steuert den kleinsten Anteil zum Gesamtoffset bei und kann in Hinblick auf die Energieauflösung im Spektrum vernachlässigt werden.

### 7.1.1 Einfluß der CPU-Rechenzeit und FIFO Größe

Die Größe des Daten FIFOs auf der Common Mode-Karte hat einen großen Einfluß auf den Algorithmus, mit dem die Offsetwerte bestimmt werden. Das Daten-FIFO der Common-Mode Karte ist nur 1024 Byte tief und 16 Bit breit. Dies bedeutet, daß nicht ein ganzes CCD-Bild zwischengespeichert werden kann, sondern maximal die Werte von 512 Pixel. Das CCD muß demnach in kleinen Schritten ausgelesen werden. Maximal passen 8 Zeilen in das FIFO, die 1024 16-Bit-Worten entsprechen. Hinzu kommt, daß die Auslesezeit des

CCDs momentan 5.83 ms (4.66 ms beim Flugmodell) beträgt, bei 20 MHz Taktfrequenz im Full Frame Modus, aber die CPU weit mehr als 1 s braucht, um die Daten vom 12800 Pixel auszulesen. Folglich kann nicht der Offset aller Zeilen gleichzeitig berechnet werden. Zur Bestimmung des Offsets werden jeweils nur wenige Zeilen im Offset-RAM als "gut" markiert. Nur dieser Zeilenbereich wird anschließend n mal ausgelesen, akkumuliert und der Mittelwert der Pixel bestimmt. Erst wenn das ganze CCD in Vierer- oder Achter-Schritten ausgelesen wurde, ist die vollständige Offsettabelle vorhanden.

## 7.2 Offsettabelle aus der CAMEX-Charakteristik

Die Untersuchungen der Offsettabelle im vorangegangenen Abschnitt haben gezeigt, daß der CAMEX-Anteil die Struktur der Offsettabelle dominiert. Diese Tatsache legt es nahe, den Offset des ganzen CCDs auf eine Zeile zu reduzieren. Aus den Daten dieser Zeile kann dann eine Offsettabelle für das ganze CCD "erzeugt" werden. Durch diese Vorgehensweise, wäre es möglich, die Anzahl der Auslesezyklen zu verringern. Dadurch kann wertvolle Zeit gespart werden, die für Beobachtungen genutzt werden kann, die sonst durch die Ausleseprozedur der Offsettabelle verloren geht.

### 7.2.1 Die verschiedenen Algorithmen zur Berechnung der Offsettabelle

Zur Berechnung der Offsetkorrektur müssen unkorrigierte Daten verwendet werden. Dies bedeutet, daß alle Korrekturen der Common-Mode Karte ausgeschaltet sind. Die untere Schwelle WELEVLOW muß auf null gesetzt werden, die Median Korrektur muß ausgeschaltet sein, und der Korrekturwert WCMOFFS wird auf null gesetzt. Zusätzlich darf das Offset-RAM nur Null-Werte enthalten, weil sonst die Daten automatisch Offset korrigiert werden würden. Die Daten des ADC werden unter diesen Vorraussetzungen direkt in das Daten-FIFO geschrieben, von wo aus sie von der CPU ausgelesen werden können. Die CPU übernimmt ab hier die eigentliche Berechnung des Offsets und legt die berechneten Werte im Offset-RAM ab. Dort können sie von der Common-Mode Karte direkt angesprochen werden, um die Messdaten zu korrigieren.

#### Alter Algorithmus

```
BEGIN:
        SET_CCD_BAD;
        LINE=0;
        WHILE LINE < 200
        {
                SET_4_LINES_GOOD;
                ENERGIE_SUMME[i][j]+ = READ_4_LINES_n_TIMES[i][j];
                SET_4_LINES_BAD;
                LINE+=4;
        }
        SET_CCD_GOOD;

        FOR(i=0 TO 63,j=0 TO 199)
        {
                OFFSET[i][j]=ENERGIE_SUMME[i][j]/n;
        }
END
```

Bisher wird vor der Berechnung des Offsets das ganze CCD als "schlecht" markiert, d.h. bei allen Pixel des CCDs wird das Bit zur Markierung als BAD-Pixel im Offset-RAM gesetzt. Anschließend werden nur 4 Zeilen, also 256 Pixel als "gut" markiert. Dies bedeutet, daß in das Daten-FIFO die 256 Werte dieser 4 Zeilen geschrieben werden, so daß das FIFO halb voll ist. Die Daten der vier Zeilen werden nun von der CPU der Reihe nach ausgelesen und in einem Array gespeichert. Dieser Ausleseprozess wird n mal wiederholt und die Werte im Array aufsummiert. Ist das FIFO n mal ausgelesen, werden die 4 Zeilen wieder als "schlecht" markiert und die folgenden 4 Zeilen analog bearbeitet. Wenn das ganze CCD ausgelesen wurde, wird jeder der 12800 Werte durch die Zahl der Auslesezyklen n dividiert und als Offsetwert im Offset-RAM abgelegt. Das Problem bei dieser Art der Offsetberechnung ist der Zeitaufwand für den Ausleseprozess. Es werden insgesamt $n \cdot 200$ Zeilen ausgelesen, für n=100 also 20000 Zeilen. Im Vergleich zur Rechenzeit benötigt der Auslesevorgang aber viel länger, was den Algorhitmus unnötig verlangsamt.

### Neuer Algorithmus

```
BEGIN:
        SET_CCD_BAD;

        SET_4_LINES_GOOD;
        ENERGIE_SUMME[i][j]+ = READ_4_Lines_n_times[i][j];

        SET_CCD_GOOD;

        FOR(i=0 TO 63, j=0 TO 3)
        {
                GAIN[i]+=ENERGIE_SUMME[i][j];
        }
        FOR(i=0 TO 63)
        {
                GAIN[i] \= 4*n;
        }
        FOR(i=0 TO 63, j=0 TO 199)
        {
                OFFSET[i][j]=GAIN[i];
        }
END
```

Die Grundidee des neuen Algorithmus besteht darin, die Tatsache daß die Offsettabelle vom der CAMEX-Struktur dominiert wird, auszunutzen, und dadurch die Zahl der Auslesezyklen zu verringern. Es soll in Zukunft auf eine genaue Bestimmung des Offsets verzichtet werden, und statt dessen nur die CAMEX-Struktur berechnet werden. Die CAMEX-Struktur des CCDs ist aber für alle Zeilen identisch. Aus diesem Grund wäre es im Prinzip ausreichend, die Struktur einer Zeile zu bestimmen und auf die restlichen Zeilen zu übertragen. Allerdings wären dann die Auswirkungen der Common-Mode Struktur noch zu hoch. Dies bedeutet, daß zusätzlich eine Mittelung über meherere Zeilen vorgenommen werden sollte. Diese Vorgehensweise ist in dem oben abgebildeten Algorithmus verwirklicht. Bei dieser Art, den Offset zu bestimmen, werden nur die ersten vier Zeilen ausgelesen und aus ihrem Mittel wird eine "Offsetkarte" erzeugt, mit der die Daten aller Zeilen korrigiert werden.

Zu Beginn der Offset-Messung wird das ganze CCD als "schlecht" markiert und analog wie beim alten Algorithmus die ersten vier Zeilen n mal ausgelesen. Die Daten aus den vier Zeilen werden dann über die vier Zeilen und die n Auslesezyklen gemittelt. Als Ergebnis ergibt sich die CAMEX-Struktur in einem Array mit 64 Elementen. Anschließend wird die Offsettabelle aus diesen 64 Werten generiert, indem die 64 Werte für alle 200 Zeilen übernommen werden. Die Anzahl der Auslesezyklen verringert sich bei dieser Art der Offsetberechnung um einen Faktor 50, d.h. es werden für n=100 nur noch 400 mal 256 Werte aus dem FIFO ausgelesen.

### 7.2.2 Vergleich der beiden Algorithmen

An erster Stelle soll die Performance der Offsetberechnung näher untersucht werden. Die Zeiten, die für die Berechnung einer Offsettabelle eines CCDs benötigt werden und die daraus resultierenden Zeiten für einen ganzen Quadranten sind in Tabelle 7.1 zusammengefaßt. Den Messungen wurde der Algorithmus zur Berechnung des Offsets zu Grunde gelegt, wie er zur Zeit dieser Arbeit verwendet wurde. Beim Umsetzen des neuen Algorithmus in die CPU-Software wurde darauf geachtet, außer den oben aufgeführten Optimierungen keine weiteren Veränderungen an der Software vorzunehmen. Die Auslese- und Rechenzeiten können so direkt miteinander verglichen werden.

**Zeiten zur Berechnung einer Offsettabelle**

| | alter Algorithmus | | | neuer Algorithmus | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lesen | Rechnen | Gesamt | Lesen | Rechnen | Gesamt |
| Einzel-CCD | 366 sec | 2 sec | 368 sec | 11 sec | 2 sec | 13 sec |
| 3 CCDs (Quadrant) | 1098 sec | 6 sec | 1104 sec | 33 sec | 6 sec | 39 sec |

**Tab. 7.1:** Vergleich der Performance der beiden Algorithmen zur Berechnung einer Offsettabelle. Die Anzahl der Auslesezyklen betrug in beiden Fällen n=100.

Ein Vergleich der Auslese- und Rechenzeiten macht deutlich, daß der neue Algorithmus um den Faktor 28 schneller ist als der alte. Die Rechenzeiten ändern sich zwischen den zwei Varianten überhaupt nicht, was bei der geringen Anzahl an Rechenoperationen auch verständlich ist. Nun stellt sich natürlich die Frage, inwiefern sich die neue Art der Offsetberechnung auf das Spektrum bzw. die Energieauflösung auswirkt. Dazu wurden Daten ausgewertet, die mit einer Offsettabelle nach dem alten und neuen Prinzip korrigiert wurden.

#### Struktur der beiden Offsettabellen

Doch bevor die Messergebnisse im einzelnen besprochen werden, soll die Struktur der neuen Offsettabelle dargestellt werden. Die Offsettabelle, die aus der CAMEX-Struktur bestimmt wurde, zeigt deutlich ein Streifenmuster (siehe Abbildung 7.3). Dieses Streifenmuster in Spaltenrichtung wird auch erwartet, da jeder Zeile die gleichen Offsetwerte zugewiesen werden. In der Offsettabelle, die nach dem alten Algorithmus bestimmt wurde, ist deutlich diese CAMEX-Struktur erkennbar. Diese Offsettabelle unterscheidet sich außerdem noch von der in der Abbildung 7.1 dargestellten Karte des Gesamtoffsets durch eine Vierer-Struktur in Spaltenrichtung. Die Common Mode-Struktur ist in dieser Tabelle nicht erkennbar, da sie durch die Vierer-Struktur überdeckt wird. Der Ursprung dieser Vierer-Struktur ist noch nicht vollständig geklärt und tritt nur mit der neuen EPEA-Hardware auf. Die Karte des Gesamtoffsets in Abbildung 7.1 hingegen wurde noch mit der älteren Testversion der EPEA gewonnen.

Berechnet man die Differenz der beiden Offsettabellen, dann erhält man das in Abbildung 7.3 ganz unten dargestellte Bild. Im Differenzbild wird vor allem die Vierer-Struktur deutlich sichtbar. Nur schwach als Hintergrund erkennbar ist der eigentliche Pixel-Offset des CCDs und das restliche Common Mode-Rauschen. Aus dem Differenzbild wurde zusätzlich ein Differenzspektrum angefertigt, das in Abbildung 7.4 ganz oben dargestellt ist. Die Werte des Differenzspektrums sind um 25 ADC zentriert und streuen um $\pm 25$ ADC.

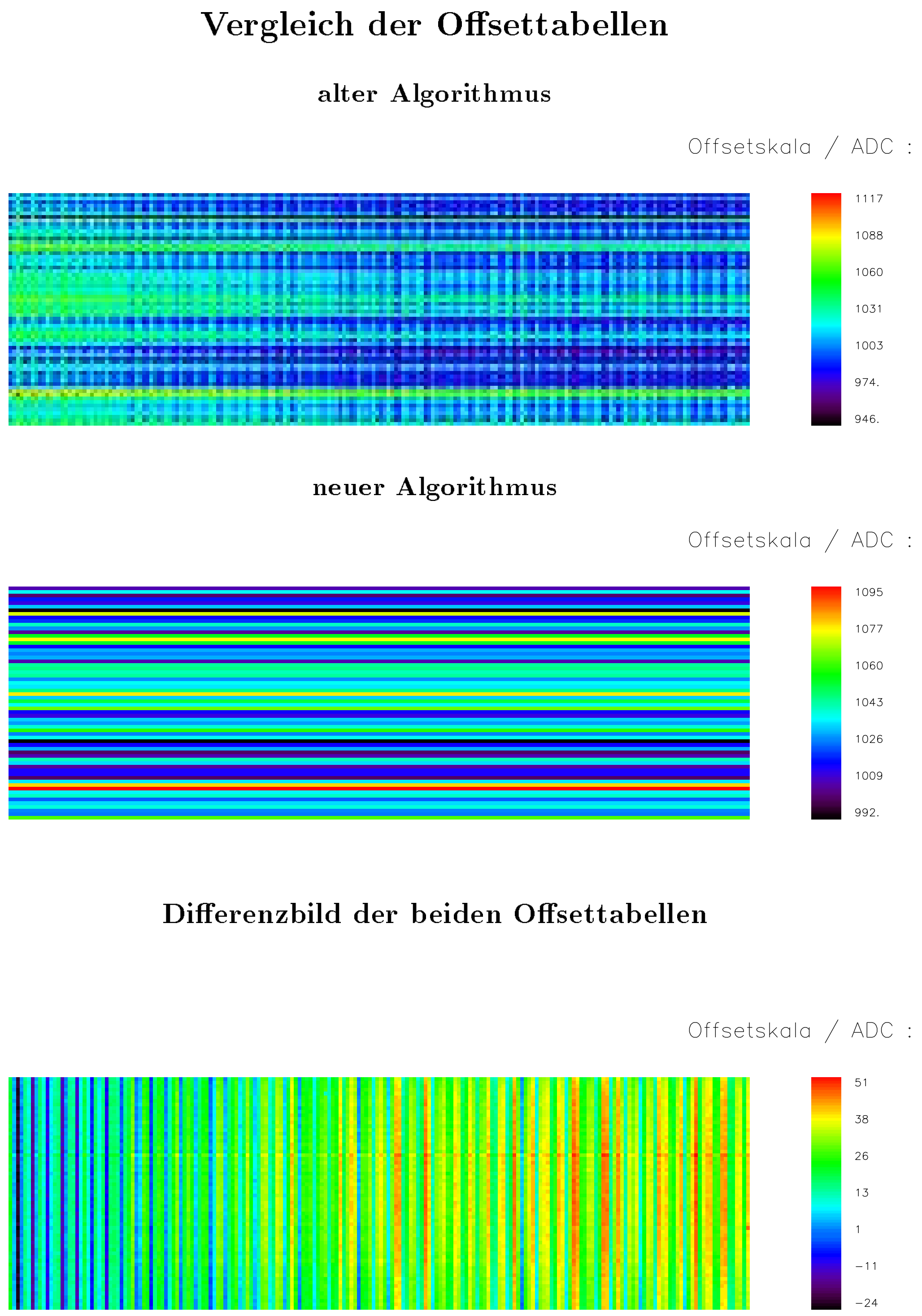
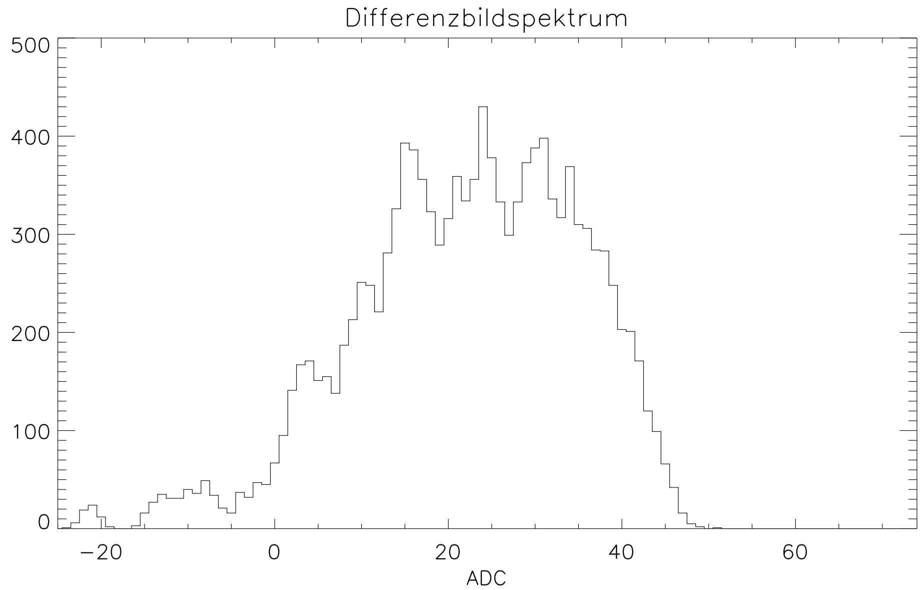



**Abb. 7.3:** Von oben nach unten: Dargestellt sind eine Offsettabelle, die mit dem alten Algorithmus berechnet wurde, eine die nach dem neuen berechnet wurde und ein Differenzbild der beiden Tabellen.

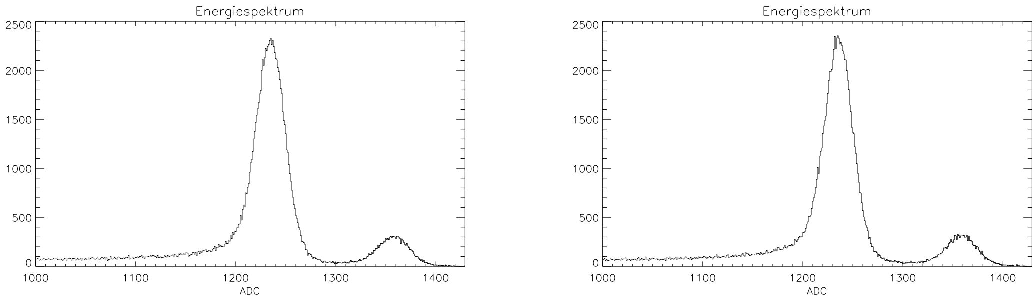
## Differenzspektrum der Offsettabellen




## Spektren mit unterschiedlicher Offsetkorrektur

### Gain- und CTE-korrigierte Spektren

**alter Algorithmus** **neuer Algorithmus**




### Unkorrigierte Rohspektren

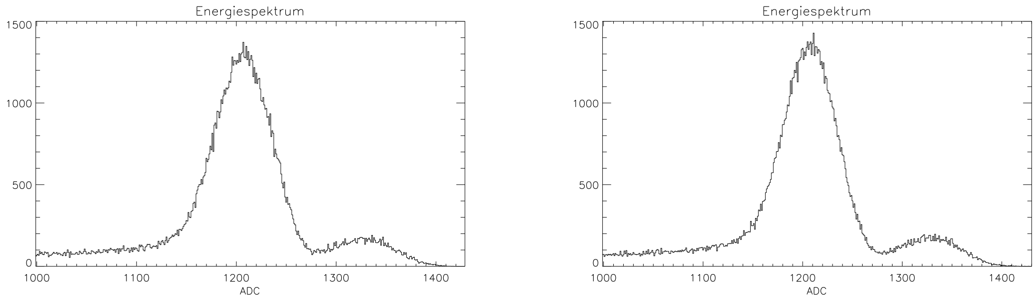



**Abb. 7.4:** Die Energiespektren sind jeweils mit einer Offsettabelle aus 100 Auslesezyklen korrigiert worden.

### Auswirkungen auf das Energiespektrum

Die Spektren aus den Daten, die mit den unterschiedlichen Methoden der Offsetberechnung gewonnen wurden, zeigt der untere Teil der Abbildung 7.4. Den Messungen wurden Offsettabellen zu Grunde gelegt, die aus n=100 bzw. n=25 Auslesezyklen gewonnen wurden. Für den Offsetwert einer Zeile bedeutet dies, daß nach dem alten Algorithmus bei n=100 eine Mittelung über 100 Einzelwerte pro Zeile stattfindet. Da beim neuen Algorithmus, zusätzlich über die vier Zeilen gemittelt wird, bedeutet dies, daß bei gleichem n eine Mittelung über 400 Einzelwerte pro Zeile stattfindet. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Messung durchgeführt, bei der der mittlere Offset nach der neuen Methode aus 25 Auslesezyklen, also auch aus 100 Einzelwerten pro Zeile bestimmt wurde. Die sich daraus ergebenden Messwerte sind in der Tabelle 7.2 zusammengefaßt. Überraschend ist die Tatsache, daß die Energieauflösung bei der neuen Art den Offset zu berechnen, genau so gut ist wie bei einer Offsetkorrektur nach der bisherigen Methode. Dies bedeutet, daß der neue Algorithmus keinen negativen Einfluß auf die Energieauflösung der Spektren hat. In den nicht Gain- und CTE-korrigierten Spektren unterscheidet sich die Breite der Linien um 7 %, wenn die Daten aus jeweils 100 Auslesezyklen verglichen werden. Dies ist aber aus statistischen Gründen wie oben gezeigt wurde nicht ganz korrekt. Vergleicht man die Ergebnisse aus 100 Auslesezyklen nach der alten Methode mit den Daten aus 25 Auslesezyklen der neuen Methode, dann beträgt die Differenz nur noch 1 ADC im unkorrigierten Spektrum.

**Messergebnisse aus den Spektren**

| | alter Algorithmus 100 | | neuer Algorithmus 100 | | neuer Algorithmus 25 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe $K_\alpha$-Linie [ADC] | korrigiert | unkorrigiert | korrigiert | unkorrigiert | korrigiert | unkorrigiert |
| Zentrum | 1234.06 | 1206.14 | 1235.11 | 1206.59 | 1235.51 | 1206.06 |
| $\sigma$ | 14.82 | 28.17 | 14.63 | 26.60 | 14.84 | 27.11 |
| Fläche | 81052.61 | 85483.57 | 80284.05 | 84700.26 | 80691.39 | 84933.59 |
| Höhe | 2181.49 | 1210.68 | 2188.70 | 1270.40 | 2168.68 | 1249.91 |
| Photonen-Rate | ca. 640 $\frac{\text{Events}}{\text{sec}}$ | | | | | |

**Tab. 7.2:** In der Tabelle sind die Meßdaten zusammengefaßt die sich aus den korrigierten und unkorrigierten Spektren ergeben. Die Zahlen 100 und 25 stehen für die Anzahl n der Auslesezyklen.

Allerdings muß ergänzend erwähnt werden, daß bei den Messungen nur die Linie einer Energie berücksichtigt wurde, nämlich die Fe $K_\alpha$-Linie. Inwiefern sich die neue und viel schnellere Art der Offsetbestimmung auf die Korrektur eines Spektrums mit mehreren Linien unterschiedlicher Energie auswirkt, ist zur Zeit dieser Arbeit noch nicht bekannt und muß noch untersucht werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß nur jeweils 4 Zeilen des CCDs zur Offsetbestimmung ausgewertet werden. Wenn nun eine oder mehrere Zeilen durch eine Veränderung im CCD einen höheren Offset hätten, dann könnte dieser nicht erkannt werden. Auch stark rauschende Pixel, die in einer der vier Zeilen liegen, würden diese Art der Korrektur verfälschen. Deshalb sollten eventuell beide Möglichkeiten realisiert werden, damit zumindest zur Fehlerdiagnostik eine Offsettabelle des ganzen CCDs berechnet werden kann.

Eine weitere Alternative bietet die Möglichkeit, das ganze CCD nur einmal auszulesen. Die so erhaltenen Daten werden dann über die 200 Zeilen gemittelt und die sich daraus ergebenden 64 Werte anschließend allen Zeilen des CCDs zugewiesen. Bei dieser Möglichkeit der Offsetberechnug würde das gesamte CCD mit berücksichtigt werden.

# Kapitel 8

# Der "Bimetalleffekt" der CCD-Platine

Die CCD-Platine ist nach dem Mehrschichtprinzip aufgebaut, d.h. sie besteht aus mehreren übereinanderliegenden Schichten Kunststoff und Kupfer. Da diese beiden Materialien unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, ist anzunehmen, daß beim Kühlen des CCDs eine Art "Bimetalleffekt" auftritt. Dieser Effekt führt dazu, daß sich die Platine durchbiegt und eventuell die Bonddrähte zwischen CCD und CCD-Platine, beschädigt werden. Dieser Effekt wurde vor allem bei einer Testversion der CCD-Platine erwartet, die in Tübingen zu Testmessungen verwendet wurde. Um die Ausmaße des Effekts genau bestimmen zu können, wurde eine Messreihe durchgeführt, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

## 8.1 Versuchsaufbau und Auswertung

Um die Auslenkung der Platine messen zu können, wurde auf die CCD-Platine, im Bereich der Bonddrähte, ein 7 x 8 mm$^2$ großer Spiegel aus Silizium geklebt. Dieser Spiegel lenkt den von einem Laser kommenden Lichtstrahl über ein Umlenkprisma auf einen Projektionsschirm. Der Strahlengang und der Versuchsaufbau kann der Abbildung 8.3 entnommen werden.

Eine Verbiegung der CCD-Platine bewirkt somit eine Auslenkung des Laserstrahls auf dem Projektionsschirm. Eine vertikale Bewegung der Platine kann mit diesem Aufbau jedoch nicht registriert werden, d.h. eine vertikale Expansion oder Kontraktion des Kühlfingers bzw. der Platinenhalterung wird nicht detektiert. Schematisch ist diese Verformung der Platine in Abbildung 8.1 dargestellt. Gezeichnet ist ein vertikaler Schnitt durch die Platine und ihre Halterung, in Ruhelage (durchgezogene Linie) und mit der Auslenkung h (gestrichelte Linie). Die maximal zulässige Auslenkung h an den Bonddrähte zwischen CCD-Platine und CCD beträgt ungefähr 100 $\mu$m. Dies entspricht einem Winkel $\alpha = \arctan(\frac{0.1\,\mathrm{mm}}{32\,\mathrm{mm}}) = 0.199\,°$. Die geometrischen Verhältnisse bei der Reflektion des Laserstrahls am Spiegel zeigt die Abbildung 8.2. Es sind zwei mögliche Spiegelstellungen , sowie die Abhängigkeiten der Winkel untereinander dargestellt.

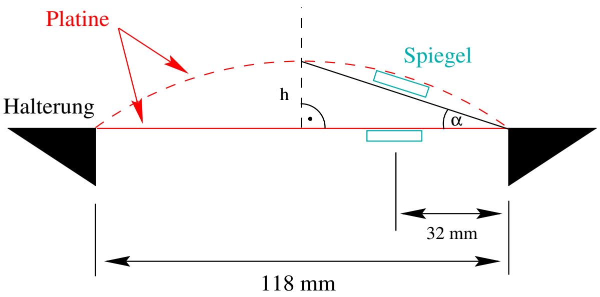



**Abb. 8.1:** Schematische Zeichnung des Biegeeffekts.

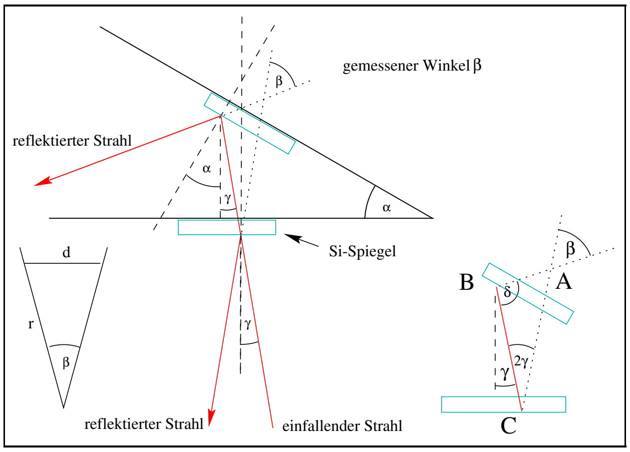



**Abb. 8.2:** Winkelverhältnisse bei der Reflektion des Laserstrahls am Spiegel.

Der Winkel $\alpha$ legt die Auslenkung des Spiegels fest. $\beta$ folgt nach

$$\beta = \frac{d}{r}$$

aus der Wegstrecke d, die der projizierte Punkt auf dem Projektionsschirm zurückgelegt hat, und aus r, dem Abstand des Projektionsschirms vom Spiegel. Gemessen wurde beim Kühlvorgang eine Auslenkung $d_1 = 3.05\,\mathrm{cm}$ und $d_2 = 3.35\,\mathrm{cm}$ beim anschließenden Wiederaufheizen. Mit $r = 446.0\,\mathrm{cm}$ folgt also

$$\beta_1 = \frac{3.05\,\mathrm{cm}}{446.0\,\mathrm{cm}} = 6.838\,\mathrm{mrad} = 0.392\,° \tag{8.1}$$

$$\beta_2 = \frac{3.35\,\mathrm{cm}}{446.0\,\mathrm{cm}} = 7.511\,\mathrm{mrad} = 0.430\,° \tag{8.2}$$

Für das in Abbildung 8.2 eingezeichnete Dreieck ABC und für die Winkelsumme beim Winkel $\delta$ gilt

$$180\,° = \delta + \beta + \gamma \tag{8.3}$$

$$\text{und } 180\,° = \delta + 2\gamma + 2\alpha \tag{8.4}$$

Durch auflösen nach $\delta$ und einsetzen von 8.3 in 8.4 ergibt sich

$$180\,° = 180° - 2\gamma - 2\alpha + \beta + 2\gamma \tag{8.5}$$

$$2\alpha = \beta \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{2} \tag{8.6}$$

Damit lassen sich die Winkel $\alpha_1$ und $\alpha_2$ berechnen

$$\alpha_1 = \frac{\beta_1}{2} = 0.196\,° \text{ (kühlen auf -130° C)}$$

$$\alpha_2 = \frac{\beta_2}{2} = 0.215\,° \text{ (aufwärmen auf 20° C)}$$

Ein Vergleich mit der maximal erlaubten Auslenkung von 0.199 ° zeigt, daß die beobachtete Verbiegung der Platine zu stark ist, und diese CCD-Platine nicht verwendet werden kann. Aus diesem Grund wurde ein neuer Platinen-Typ entwickelt, der eine andere innere Struktur hat und sich dadurch nicht mehr so stark biegt.

Die Richtung, in welcher die Bewegung der Platine stattfindet, kann leicht aus den einzelnen Meßpunkten rekonstruiert werden. Eine genauere geometrische Überlegung ergibt, daß die Platine sich beim Kühlen in positiver z-Richtung (siehe Koordinatensystem in Abbildung 8.3) bewegt hat. Beim anschließenden Aufwärmprozess hat eine genau entgegengesetzte Bewegung in negativer z-Richtung stattgefunden.

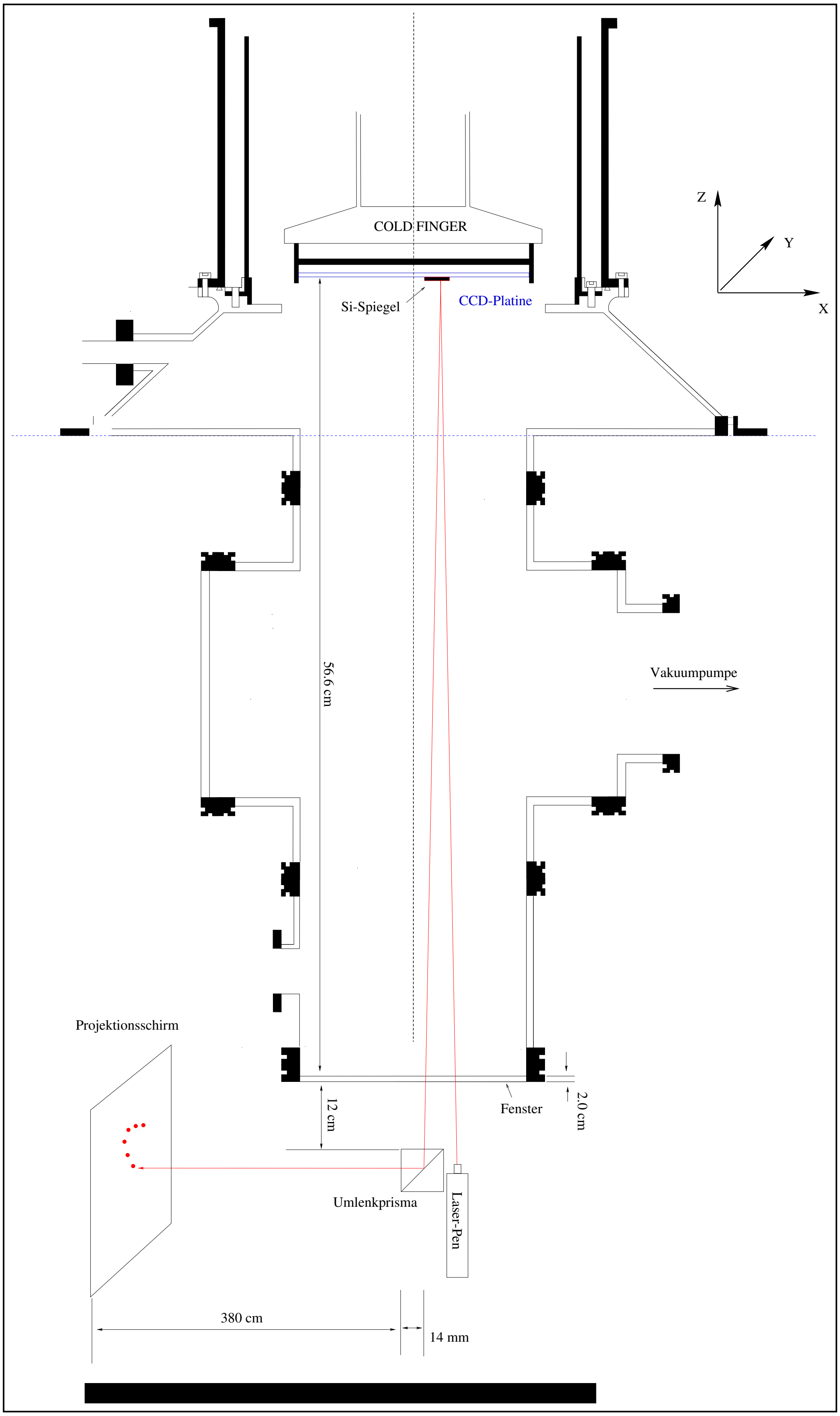



**Abb. 8.3:** Versuchsaufbau zum Test der CCD-Platine auf Durchbiegung während des kühlens.

# Kapitel 9

# Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde am IAAT ein Vakuumteststand entwickelt und gebaut, der es ermöglicht, den Kamerakopf EPCH unter Weltraumbedingungen zu betreiben und zu testen. Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen, einen ganzen Quadranten bei definierten Druck- und Temperaturbedingungen zu betreiben. Über mehrere Tage hinweg ist so ein Betrieb des CCDs bei einem Druck $\leq 10^{-7}$mbar und bei einer Temperatur $\leq$ -133° C möglich. Dies ist vor allem wichtig im Hinblick auf die Detektortests für ABRIXAS und die Weiterentwicklung der CPU-Software (z.B. die MIP-Korrektur) für XMM.

Es wurden Messungen mit einem speziell angefertigten CCD der Version C8_1_10 durchgeführt, in das die Strukturen der Übergänge zwischen CCDs und Quadranten eingearbeitet sind. Diese Messungen führten zu dem Ergebnis, daß sich hauptsächlich die QE und das Splitverhalten des Detektors im Bereich der Übergänge drastisch verändert. Genaue Messungen ergaben, daß die QE im Rückkontaktschnitt bis auf 55 % zurückgeht.

Für den Fall des Quadrantenübergangs wurde eine mögliche Erklärung der beobachteten Effekte gegeben, die auf Simulationen der Potentialverhältnisse im Halbleiter beruht. Da diese Simulationen auf stark vereinfachten Modellen basieren und die genauen Potentialverhältnisse im Halbleiter nicht bekannt sind, müssen in Zukunft zusätzliche Messungen durchgeführt werden, bei denen definierte und beeinflußbare Potentialverhältnisse am Rückkontakt und damit im Halbleiter herrschen. Dies war mit dem CCD C8_1_10 nicht möglich.

Zu den Effekten im Bereich der CCD-Übergänge gab es zur Zeit dieser Arbeit mehrere Ansätze der Erklärung, die aber teilweise noch im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen standen. Dies lag unter anderem auch an der Tatsache, daß im Rahmen dieser Arbeit keine bzw. nur wenige Messungen bei unterschiedlichen Energien gemacht werden konnten und auch sonst noch keine auswertbaren Daten existierten. Auch hier müssen in Zukunft noch detaillierte Untersuchungen vorgenommen werden.

Da das EQM-Modell und das voraussichtliche Flugmodell des CCDs eine andere Struktur haben als des CCD C8_1_10, sind die Auswirkungen der Übergänge dort nicht so gravierend. Dies haben auch Messungen an neueren Versionen des CCDs im Halbleiterlabor in München gezeigt. Wie die momentanen Leistungsparameter des CCDs und der EPEA-Hardware sind, wird sich bei der Auswertung der EQM-Testmessungen an der Panter-Anlage in Neuried zeigen, die Mitte Februar 1997 stattfanden. Bei diesen Messungen besteht auch die Möglichkeit, das Gesamtsystem, bestehend aus Spiegelmodul und pn-CCD Kamera, umfangreich zu testen.

# Anhang A

# Pläne

## 1.1 Pläne der Vakuumanlage

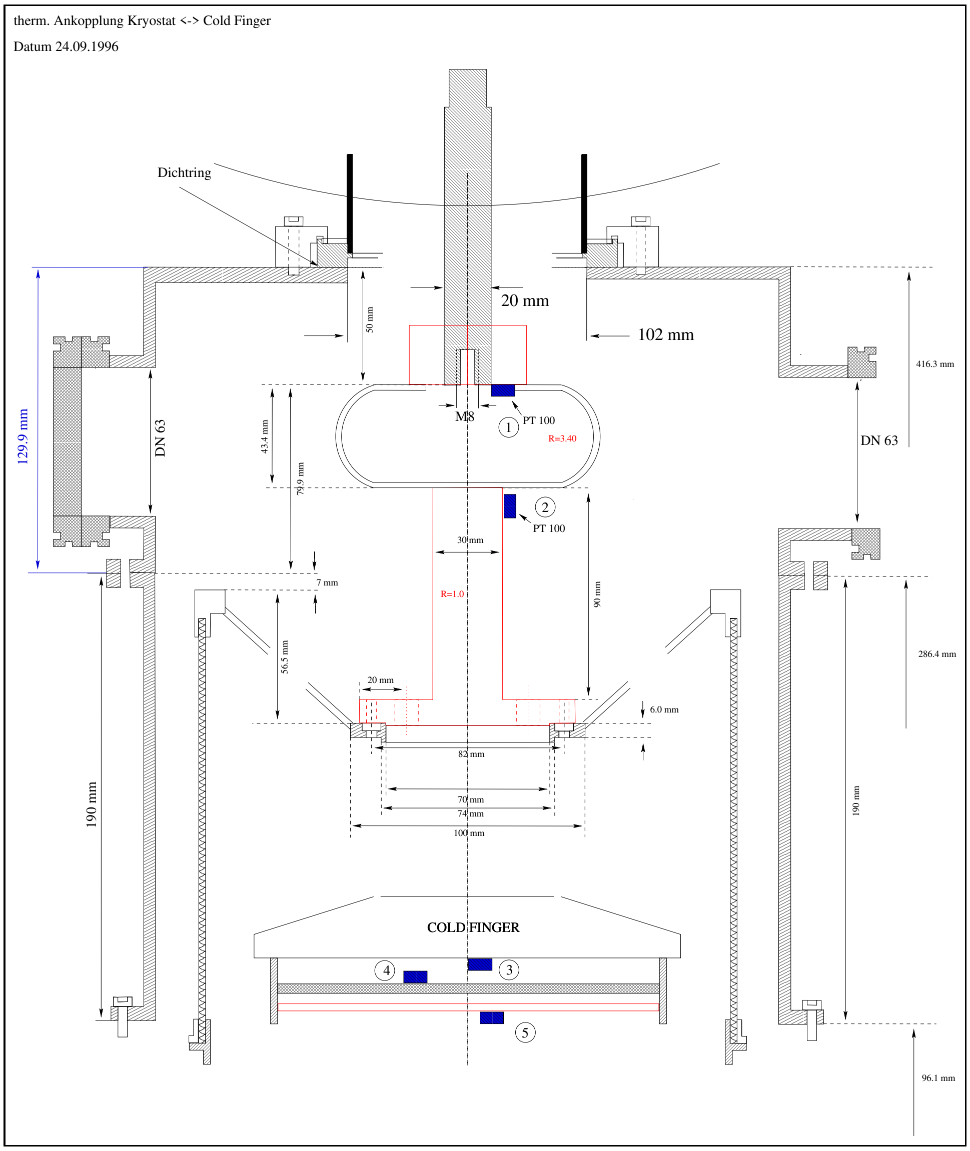



**Abb. A.1:** Die Ankopplung des Kühlfingers der EPCH an das Kühlsystem der Vakuumanlage.

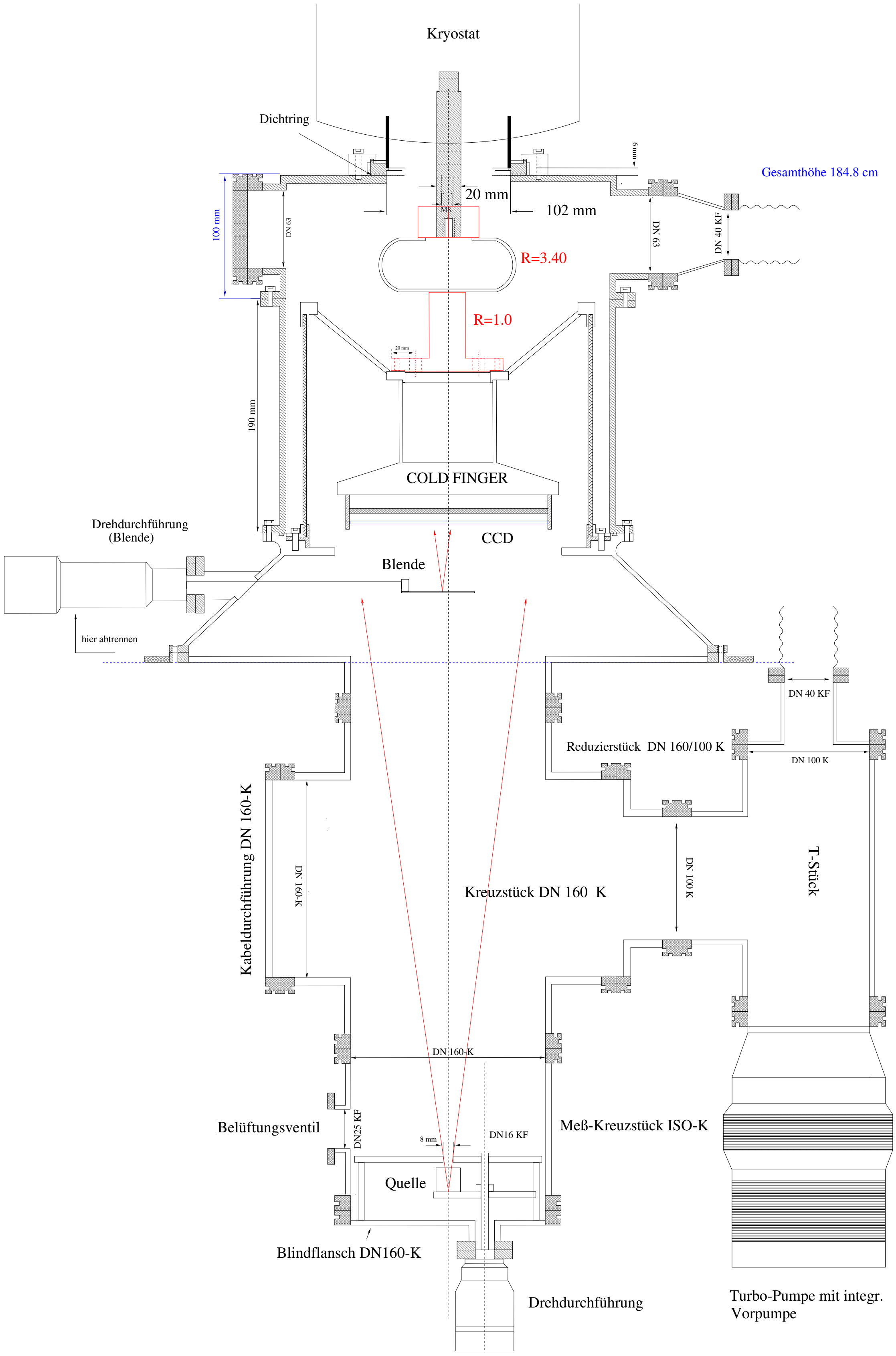



**Abb. A.2:** Schema der Vakumtestanlage am IAAT.

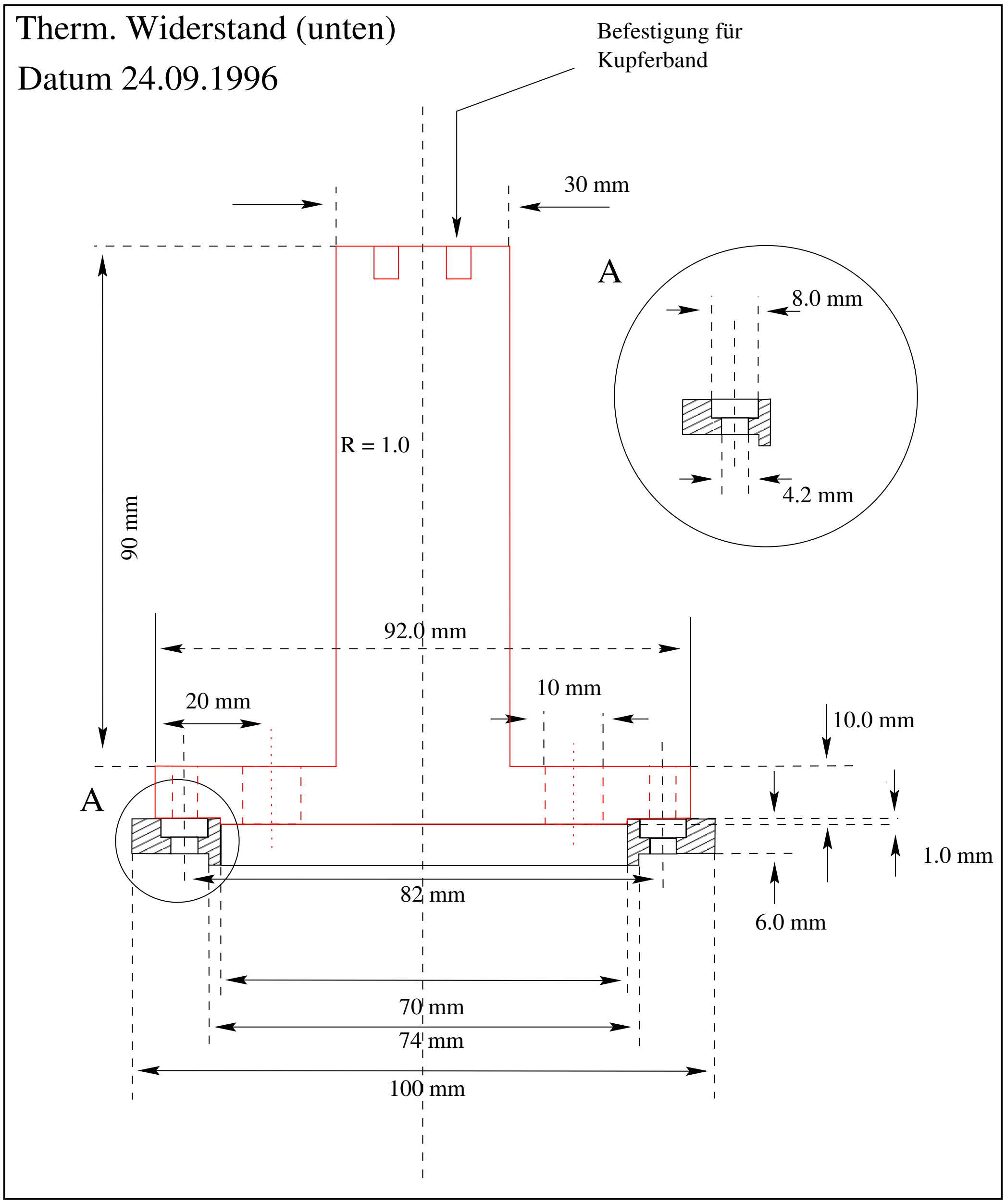



**Abb. A.3:** Der untere Teil des thermischen Widerstandes.

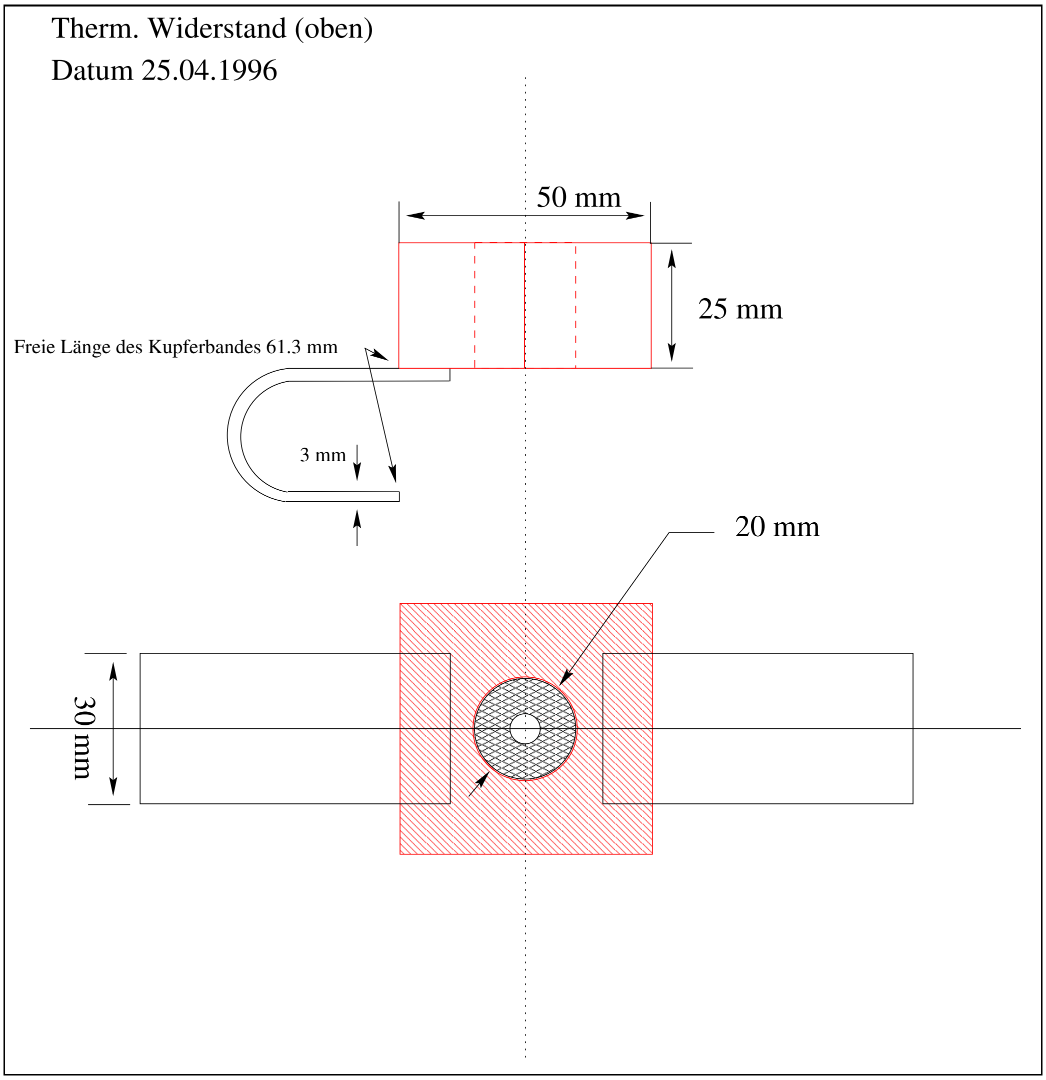



**Abb. A.4:** Der obere Teil des thermischen Widerstandes.

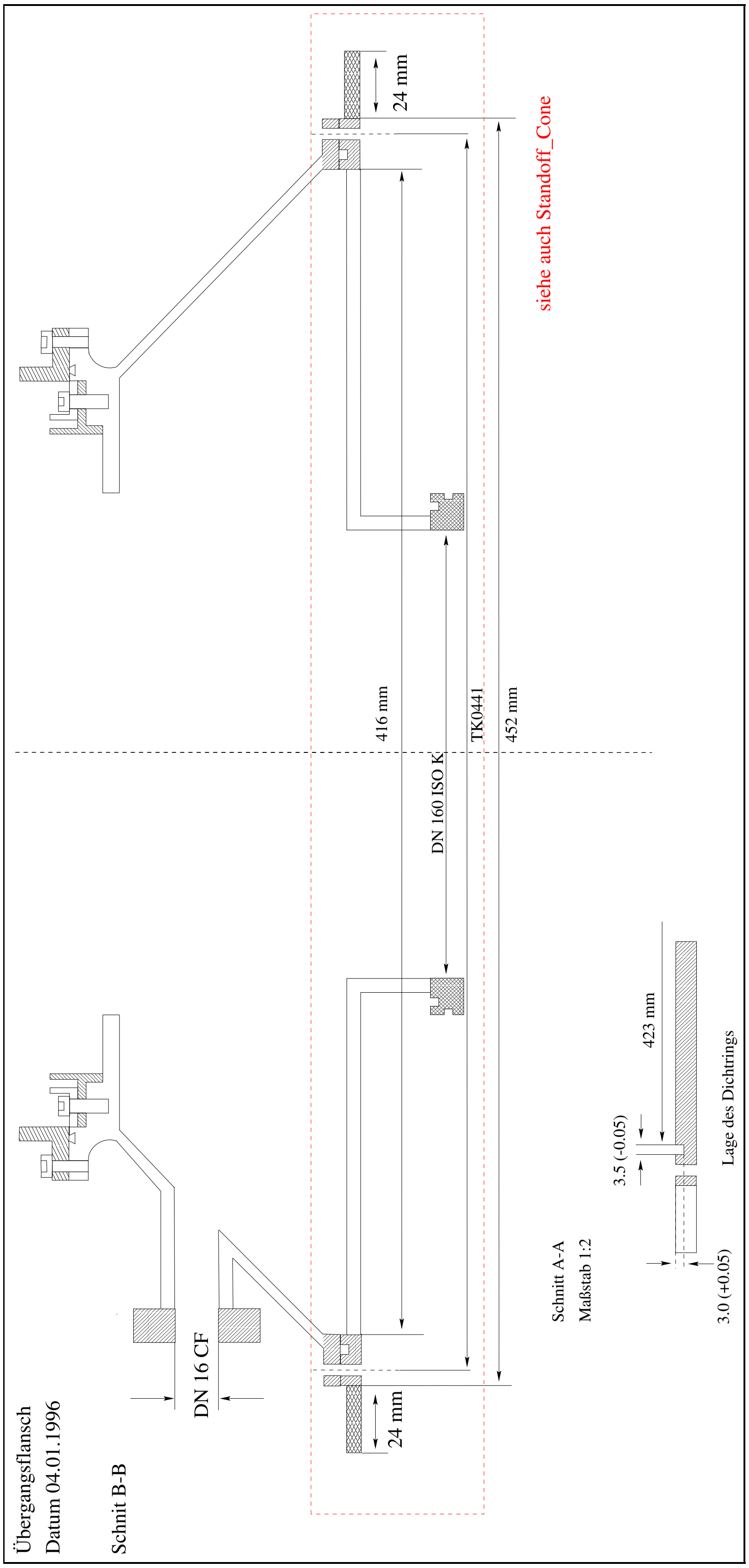



**Abb. A.5:** Übergangsflansch vom Kamerakopf auf Normteile der ISO-Norm.

# Anhang B

# Technische Daten der Vakuumanlage

## 2.1 Turbomolekular-Pumpe

| | |
|---|---|
| Pumpleistung ($N_2$) | 125 l/s |
| Kompressionsverhältnis | $5 * 10^{10}$ |
| niedrigster Druck | $10^{-9}$ mbar |
| max. Drehzahl der Turbine | 27000 U/min |
| max. Pumpvolumen | 100 l |
| Gewicht | 3.9 Kg |

**Tab. B.1:** Technische Daten der ATS 100.

## 2.2 Vakuumanlage

| | |
|---|---|
| Temperatur am CCD (nicht in Betrieb) | -139.5° C |
| Temperatur am Kühlfinger | -153° C |
| Temperatur CCD-Platine | -114° C |
| Temperatur am CCD (in Betrieb mit 1 W Verlustleitung) | -133° C |
| Temperatur am Kühlfinger | -149.0° C |
| Temperatur CCD-Platine | -61.1° C |
| Volumen der Kammer ohne Kamerakopf | 50 l |
| Druck in der Kammer (ungekühlt) | $4.3 \cdot 10^{-7}$ mbar |
| Druck in der Kammer (gekühlt) | $3.1 \cdot 10^{-8}$ mbar |
| Heizleistung der Heizbänder | 1.2 KW |
| $N_2$ Verbrauch | ca. 0.35 l/h |
| Höhe | 194 cm |
| Breite | 70.5 cm |
| Länge | 120 cm |

**Tab. B.2:** Betriebsparameter der Vakuumkammer.

## 2.3 Stickstoff-Kryostat

| | |
|---|---|
| Leckrate ungekühlt | $10^{-8}$mbar · l · $s^{-1}$ |
| Inhalt | 3.1 l |
| Betriebstemperatur | 77 K |
| Betriebsdruck | 0-1.5 bar |
| Medium | $N_2$ |
| Gewicht | 3.9 Kg |

**Tab. B.3:** Technische Daten des Kryostaten.

# Literaturverzeichnis


[Bih96] Edgar Bihler. Analyse spezieller Effekte beim Auslesen der pn-CCD-Detektoren für die Röntgensatelliten XMM und ABRIXAS. Master's thesis, Universität Tübingen, März 1996.

[Bru95] Roland Brutscher. Messung von kosmischen Myonen mit einem PN-CCD für den Satelliten XMM. Master's thesis, Universität Tübingen, Juni 1995.

[Cas96] J. v. Casteren. The X-Ray multi mirror spacecraft, a large telescope. In Gummin Siegmund, editor, *EUV, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, volume 2808, pages 338–349, August 1996.

[CLK+96] D. de Chambure, R. Lainé, K. v. Katwijk, J. v. Casteren, and P. Glaude. The Status of the X-Ray Mirror Production for the ESA XMM Spacecraft. In Siegmund and Gummin, editors, *EUV, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, volume 2808, pages 362–375. SPIE, August 1996.

[DMS88] V. Domingo, R. Marsden, and G. Schwehm. ESA Report to the 27th COSPAR Meeting. Technical Report SP-1098, ESA, 1988.

[FHR+96] P. Friedrich, G. Hasinger, G. Richter, J. Trümper, H. Bräuninger, P. Predehl, R. Staubert, E. Kendziorra, et al., editors. *ABRIXAS, an Imaging Telescope for a 0.5-10 keV Survey*. MPE Report 263, September 1996.

[Hen26] F. Henning. *Handbuch der Physik*, volume XI. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1926.

[Kre97] Bärbel Kretschmar. Entwicklung und Realisierung des Quadranten-Steuerwerks für die pn-CCD Kamera an Bord der Satelliten XMM und ABRIXAS. Master's thesis, Universität Tübingen, 1997.

[Kru91] Frank Krull. Testmessungen an schnellen analog-digital-wandlern für eine röntgen-ccd-kamera. Master's thesis, Universität Tübingen, July 1991.

[LELP96] D. Lumb, H. Eggel, R. Lainé, and A. Peacock. X-Ray Multi-Mirror Mission - an overview. In Gummin Siegmund, editor, *EUV, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, volume 2808, pages 326–337, August 1996.

[Mar93] Richard Martini. Aufbau eines Messplatzes zur Kalibrierung der integrierten Ausleseeinheit CAMEX64 für Röntgen-CCDs. Master's thesis, Universität Tübingen, April 1993.

[MBH+96] N. Meidinger, H. Bräuninger, R. Hartmann, et al. PN-CCD detector for the European Photon Imaging Camera an XMM. In Gummin Siegmund, editor, *EUV, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, volume 2808, pages 492–504, August 1996.

[MCH96] K.O. Mason, M.S. Cropper, and R. Hunt. The XMM Optical/UV Monitor Telescope. In Gummin Siegmund, editor, *EUV, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, volume 2808, pages 438–447, August 1996.

[Mei89] Martin Meier. Untersuchungen an röntgenempfindlichen pn-CCDs. Master's thesis, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik Garching, Februar 1989.

[Mei90] Norbert Meidinger. Diffusion und Drift von Ladungen in Halbleiter-Detektoren. Master's thesis, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik Garching, Oktober 1990.

[Rai91] Urban Raidt. Split events und ihr Einfluß auf pn-CCD Energiespektren. Master's thesis, Universität Tübingen, August 1991.

[RHF+95] G. Richter, G. Hasinger, P. Friedrich, K. Fritze, J. Trümper, H. Bräuninger, P. Predehl, R. Staubert, E. Kendziorra, et al. ABRIXAS, A BRoad-band Imaging X-ray All-sky Survey. In Bassani and G. di Cocco, editors, *Imaging in High Energy Astronomy*, pages 159–162. Kluwer academic Publishers, 1995.

[Sch94a] Jörg Schaumberger. Voll depletierbare pn-CCD's für die Röngenastronomie. Master's thesis, Universität Tübingen, Februar 1994.

[Sch94b] Peter Schuster. Zeitliche und räumliche Auflösung neuartiger pn-CCDs für den Röntgensatelliten XMM. Master's thesis, Universität Tübingen, November 1994.

[Sch95] Gilbert Schwaab. Energieantwort voll depletierbarer pn-CCDs mit integrierter Verstärkungselektronik auf weiche Röntgenstrahlung. Master's thesis, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik 85740 Garching bei München, Mai 1995.

[SP] L. Strüder and M. Popp. private Kommunikation.

[Str89] Lothar Strüder. *Entwicklung neuartiger Halbleiterdetektoren zum Nachweis ionisierender Strahlung.* PhD thesis, TU München, Juli 1989.

[VAA96] G.E. Villa, A.F. Abbey, and M. Arnaud. The EPIC system onboard the ESA XMM mission. In Gummin Siegmund, editor, *EUV, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VII*, volume 2808, pages 402–413, August 1996.

[WAW88] Wutz, Adam, and Walcher. *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik.* Vieweg, 4 edition, 1988.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich in irgend einer Form während des letzten Jahres am Astronomischen Institut in Tübingen unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorheben möchte ich das sehr angenehme Arbeitsklima am Institut. Mein Dank gilt insbesondere

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

**Dr. E. Kendziorra** für die sehr angenehme Betreuung, stete Hilfsbereitschaft und die vielen Anregungen wenns mal nicht weiter ging,

**J. Krämer und H. Böttcher** für ihre Tips und Anregungen zur Elektronik und auch für ihre auflockernden Gespräche,

**A. Weidle, W. Gäbele und K. Lehmann** für ihre Hilfe bei der Bewältigung praktischer und technischer Probleme beim Bau der Vakuumanlage,

**'Ede' Bihler** für seinen unterhaltsamen Umgang, für seine Hilfe zu IDL- und 'fahne'-Problemen und für seine Diskussionen über die Heckscheibenheizung [Bih96],

**Bärbel und Peter Kretschmar** für den gemeinsamen Kampf gegen die HPs und Postscript,

**'Berni' Pflüger** für seine Unterstützung bei 'verschnepperten' Problemen mit der CPU-Software und dem Emulator und für seine lockere Art, die die Stimmung in der Hundehütte ab Mittwoch immer ansteigen ließ,

**Lothar Strüder und Martin Popp** für ihre Geduld und Hilfsbereitschaft bei Fragen zum CCD und für die Korrektur des CCD-Teils,

**J. Barnstedt** für seine Hilfe bei Fragen zur Vakuumtechnik und für sein fast endloses Bauteillager,

**J. Wilms** der immer zur Hilfe beim Kampf gegen die UNIX-Rechner bereit war,

**M. Maisack und R. D. Geckeler** für ihre Hilfestellung zur Einleitung dieser Arbeit,

**Willy Grubmiller** für die Mühe beim Korrekturlesen,

**Doris** die mich mit endloser Geduld während der stressigen Zeit des Zusammenschreibens ertragen hat und immer aufbauende Worte parat hatte,

**meine Eltern**, ohne deren Unterstützung dieses Studium in der Form nie möglich gewesen wäre,

und **Omi**,
der diese Arbeit gewidmet ist.