Aufbau einer Testumgebung und eines Röntgenmeßstandes für den Event-Pre-Prozessor bei der *MIRAX*-Mission

Diplomarbeit
vorgelegt von

Slawomir Suchy

Institut für Astronomie und Astrophysik
der Universität Tübingen

Abteilung Astronomie

August 2004

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Im Jahre 1948 konnte Thomas Burnight mit Hilfe einer V2 Rakete zum erstenmal Röntgenstrahlen von der Sonne messen. Mit dieser Messung konnte die Theorie, daß die Sonnenkorona mehrere Millionen Grad heiß ist und somit Emissionen im Röntgenbereich zeigt, bestätigt werden. 14 Jahre später, 1962, wurde, ebenfalls mit einer Rakete, die erste kosmische Röntgenquelle Sco X-1 von Riccardo Giacconi entdeckt. Dies war die offizielle Geburtsstunde der Röntgenastronomie, die sich als ein bedeutender Zweig innerhalb der Astronomischen Gemeinde etablierte. Giacconi erhielt im Jahre 2002 den Physik-Nobelpreis für seine Pionierarbeiten auf diesem Gebiet. Heute wissen wir, daß viele der astronomischen Objekte Strahlung über den gesamten Wellenlängenbereich, von Radiowellen bis zu hochenergetischen Gammastrahlen, emittieren. Aufgrund der Absorption in der Erdatmosphäre können jedoch nur direkte Beobachtungen im Optischen und im Radiobereich von der Erde aus gemacht werden. Röntgenstrahlung kann nur mithilfe von Ballonen, Raketen oder Satelliten beobachtet werden, da diese oberhalb der absorbierenden Atmosphärenschichten arbeiten können. UHURU, der erste Röntgensatellit, wurde im Jahre 1970 gestartet und entdeckte während seiner zweijährigen Betriebszeit, insgesamt 339 Röntgenquellen. Diese setzten sich grösstenteils aus Doppelsternen (Her X-1, Sco X-1), Supernova Überresten und Aktiven Galaxien (NGC 4151) zusammen. Seit dieser Zeit sind zahlreiche Satelliten zur Beobachtung des Röntgenhimmels gebaut und betrieben worden. Neben den Himmelsdurchmusterungen, den sogenannten *Surveys*, wurden auch einzelne Quellen genauer und über längere Zeitskalen beobachtet. Dank ihrer Hilfe sind heute über 100000 Röntgenquellen bekannt und die Mechanismen, die zur Entstehung von Röntgenstrahlung notwendig sind, auch weitestgehend verstanden. In den letzten Jahren wurden sehr viele neue Phänomene wie z.B. Röntgenbursts, Quasi-periodische Oszillationen oder relativistische Jets entdeckt, deren Entstehung und Ausbreitung teilweise noch nicht verstanden ist. Die aktuellen Forschungen gehen der Frage nach dem Ursprung des Universums und der genauen Entstehung von Sternen nach. Neue Satellitenmissionen sollen Langzeitbeobachtungen an Regionen des Himmels durchführen, um bis an die Grenzen des Universums zu stoßen und somit einen Einblick in die Zeit direkt nach dem Urknall zu erhalten. Auch werden Regionen lange beobachtet, um Variabilitäten auf sehr langen und kurzen Zeitskalen zu erfassen. Aus diesen Gründen wird weiter an neuen Detektoren und Optiken gearbeitet, die eine noch nie dagewesene Empfindlichkeit sowie hervorragende zeitliche und energetische Auflösung besitzen.

1.1 Motivation

Eine dieser neuen Missionen ist der "Monitor et Imageador de RAios-X" (*MIRAX*) Satellit, der in einer internationalen Kollaboration als vorgeschlagenes Projekt vorbereitet wird. An dieser

Mission ist das Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen (IAAT) mit einer *Data Processing Unit* (DPU) beteiligt, die die Kommunikation zwischen Satellit und Detektor ermöglicht und eine Vorverarbeitung der gemessenen Daten bereits auf dem Satelltiten durchführt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Testumgebung für den bereits vorhandenen Event-Pre-Prozessor (EPP) entwickelt und ein Röntgenmeßstand aufgebaut, an dem zukünftige Tests des EPPs unter Echtzeitbedingungen durchgeführt werden können. Der Vorteil dabei ist, daß der EPP direkt an einen Detektor angeschlossen werden kann und somit mit realen Datenpaketen arbeiten muß.

In Kapitel 2 wird die *MIRAX* Mission und ihre wissenschaftlichen Ziele im einzelnen vorgestellt. Ebenfalls wird noch einmal genauer auf die Detektoren, die auf *MIRAX* angebracht sind, eingegangen. Kapitel 3 stellt die wichtigsten, in der Röntgenastronomie eingesetzten, Detektoren und ihre jeweiligen Eigenschaften vor. Schließlich wird in Kapitel 4 die Funktionsweise der EPP erläutert und ein Einblick in die verwendeten Testumgebungen gegeben. Kapitel 5 gibt einen Überblick über den von mir aufgebauten Röntgenmeßstand und dessen Funktionsweise. Abschliessend werden in Kapitel 6 und 7 die gemessenen Ergebnisse vorgestellt und ein Überblick über den aktuellen Stand gegeben.

Kapitel 2

MIRAX

Der ”Monitor et Imageador de RAios-X” (*MIRAX*) ist einer von drei vorgeschlagenen Kleinsatelliten, welche zur Zeit von der Brasilianischen Weltraumagentur (Agencias Espacial Brasilera, AEB) und dem Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vorbereitet werden. Primäres Ziel von *MIRAX* ist die Erforschung der näheren galaktischen Umgebung durch kontinuierliche Beobachtung eines Großteils der galaktischen Ebene, vor allem des Galaktische Zentrums, in einem Energiebereich von 2–200 keV (Staubert et al., 2003). Da dies wegen der Bahnbewegung der Erde um die Sonne nur während neun Monaten im Jahr möglich ist, sind Beobachtungen anderer Regionen, wie z.B. Cygnus, Vela/Centaurus oder der Magellanschen Wolken, in den drei verbleibenden Monaten des Jahres beabsichtigt. In diesem Kapitel wird die *MIRAX* Mission und ihre wissenschaftlichen Ziele genauer vorgestellt.

2.1 Wissenschaftliche Ziele

Die *MIRAX* Mission ermöglicht, aufgrund der sehr guten zeitlichen Auflösung von 10μs und der kontinuierlichen Beobachtung einer einzelnen Region, Beobachtungen von Röntgenobjekten sowohl auf kurzen, einige Sekunden bis Minuten, als auch auf sehr langen Zeitskalen. Die Forschung zielt dabei besonders auf die Entwicklung von Neutronensternen (NS) und Schwarzen Löchern (*Black Hole* = BH), auf die in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen wird. Ebenso sollen unvorhersagbare Ereignisse, z.B. Röntgenbursts, die sich auf Zeitskalen von einigen Sekunden ereignen, beobachtet und systematisch erforscht werden. Bisher gab es in diesem Bereich vorwiegend zufällige Beobachtungen, da kein Instrument mit so einem großen Gesichtsfeld kontinuierliche Beobachtungen einer Region durchgeführt hat.

2.1.1 Röntgendoppelsternsysteme

In einem engen Doppelsternsystem beeinflussen sich die beiden Sterne gegenseitig in ihrer Entwicklung. Der massereichere Stern, im folgenden Primärstern genannt, entwickelt sich schneller, und kann dabei einen Teil seiner Materie an seinen Begleiter, im folgenden Sekundärstern genannt, abgeben. Abhängig von seiner Restmasse, nach der Supernova Explosion, entsteht aus dem Primärstern ein weißer Zwerg, ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Der Sekundärstern, der bei der Bildung des kompakten Objektes häufig noch ein Hauptreihenstern ist, kann durch den vorhergegangenen Massentransfer nun eine größere Masse als das Primärobjekt besitzen. Im Laufe der weiteren Entwicklung kann der Sekundärstern nun wiederum durch Akkretion seine Masse an das Primärobjekt

Abbildung 2.1: Offizielles Logo der *MIRAX* Mission

übertragen. Die am häufigsten vorkommenden Möglichkeiten sind dabei die Sternwindakkretion und der Roche-Lobe Overflow, auf die im folgenden näher eingegangen wird (Karttunen et al., 1990).

Sternwind

Bei sehr massereichen O- und B-Sekundärsternen ($\gtrsim 10\,\mathrm{M}_\odot$), den sogenannten High Mass X-Ray Binaries (HMXB), ist der Strahlungsdruck an der Oberfläche des Sterns stärker als die Gravitationskraft, so daß Materie, von bis zu $10^{-5}\mathrm{M}_\odot/$Jahr als Sternwind in alle Richtungen weggeblasen wird. Ein Teil des Sternwinds, $\approx 10^{-9}\mathrm{M}_\odot/$Jahr wird vom kompakten Objekt eingefangen und akkretiert. Da die eingefangene Materie einen Drehimpuls besitzt, bildet sich unter Umständen eine kleine Akkretionsscheibe aus.

Roche-Lobe Overflow

Ist die Masse des Sekundärsterns geringer ($\lesssim 1.2\,\mathrm{M}_\odot$), sogenannte Low Mass X-Ray Binaries (LMXB), kann nur Masse abgegeben werden, wenn der Stern im Laufe seiner Entwicklung größer als sein *Roche-Lobe* wird. Der *Roche-Lobe* ist die Grenze, an der die Äquipotentiallinien des Gravitations- und Zentrifugalpotentials eines Doppelsternsystems ein lokales Minimum bilden (siehe Abb. 2.2 & 2.3). Der Sattelpunkt zwischen Primärobjekt und Sekundärstern wird 1. Lagrangepunkt genannt. Ist der Sekundärstern größer als sein *Roche-Lobe*, so ist der Einfluß des Gravitationspotentials des Primärobjekts dominierend auf die Materie und ein Massentransfer findet über den 1. Lagrangepunkt statt. Da die abgelöste Materie einen Drehimpuls besitzt, entsteht eine Akkretionsscheibe, in wel-

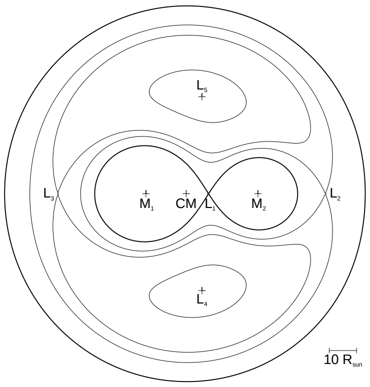

Abbildung 2.2: 2-Dimensionale Darstellung des *Roche* Potentials von Cygnus X-1 mit $M_1 = 16 \pm 2\,M_\odot$ und $M_2 = 8 \pm 3\,M_\odot$ (Wilms, 2001).

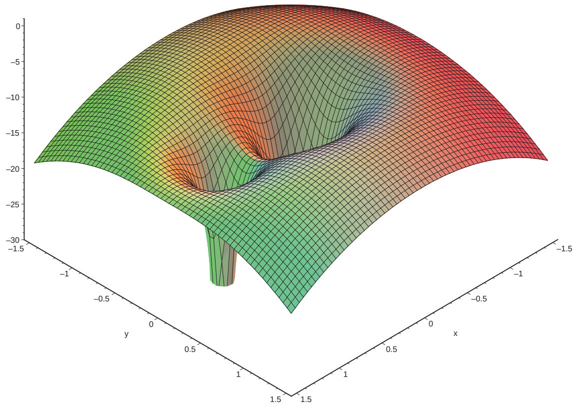

Abbildung 2.3: 3-Dimensionale Darstellung eines *Roche* Potentials, welches mit Maple berechnet wurde. Die Z-Achse stellt dabei die Stärke des Potentials dar.

cher der Drehimpuls durch Reibung zwischen den einzelnen Teilchen abgebaut werden kann, und das Material auf Quasi-Kreisbahnen langsam auf das Primärobjekt fällt.

2.1.2 Entwicklung von Sternen zu Neutronensternen

Neutronensterne wurden das erste Mal im Jahre 1934, kurz nach der Entdeckung des Neutrons, von Walter Baade und Fritz Zwicky vorhergesagt (Baade & Zwicky, 1934). Beträgt die Restmasse, aus der sich bei einer Supernova Explosion eines Sternes ein kompaktes Objekt entwickelt, mehr als $1.44\,M_\odot$, die sogenannten Chandrasekhar Masse, so entsteht ein Neutronenstern mit einer Dichte von $\approx 10^{14}\mathrm{g/cm^3}$. Im Jahre 1968 wurde der erste Neutronenstern, in Form eines Pulsars, von Antony Hewish und Jocelyn Bell entdeckt (Bell et al., 1968).

Röntgenbursts

Im Jahre 1975 wurden zum ersten mal Röntgenbursts bei 3U $1820 - 30$ im Sternhaufen NGC 6624 vom Astronomical Netherlands Satellite (ANS) beobachtet (Grindlay & Heise, 1975). Als eine mögliche Ursache solcher Bursts wird eine thermonukleare Explosion auf der Oberfläche des NS vermutet. Die akkretierte Materie fällt auf den Neutronenstern und verteilt sich dabei auf der Oberfläche. Erreicht das entartete Helium eine kritische Masse, so erfolgt eine spontane Zündung, die sich über die ganze Oberfläche des NS ausbreitet. Solche Explosionen, auch Typ I Bursts genannt, sind nur von sehr kurzer Dauer, einige Sekunden bis Minuten, und treten in unregelmäßigen Abständen auf. Systeme die so ein Verhalten zeigen werden auch Burster genannt. Bisher konnten nur sehr wenige Systeme als Burster identifiziert werden, jedoch zeigt sich eine Korrelation von Intensität und Wiederholfrequenz bei den jeweiligen Ausbrüchen. In letzter Zeit wurden sehr lange Röntgenbursts, mit einer Dauer von mehreren Stunden, beobachtet (Cornelisse et al., 2000). Es wird vermutet, daß diese sogenannten *Superbursts* bei einer spontanen Entzündung von Kohlenstoff, welcher durch Heliumbrennen entsteht, ausgelöst werden. Da bisher nur sieben solcher Bursts beobachtet worden sind, lassen sich noch keine genaueren Aussagen über dieses Phänomen treffen. Durch das kontinuierliche Beobachten einer großen Himmelsregion könnten mehr Superbursts gemessen und ein Vergleich mit den schwächeren Bursts durchgeführt werden.

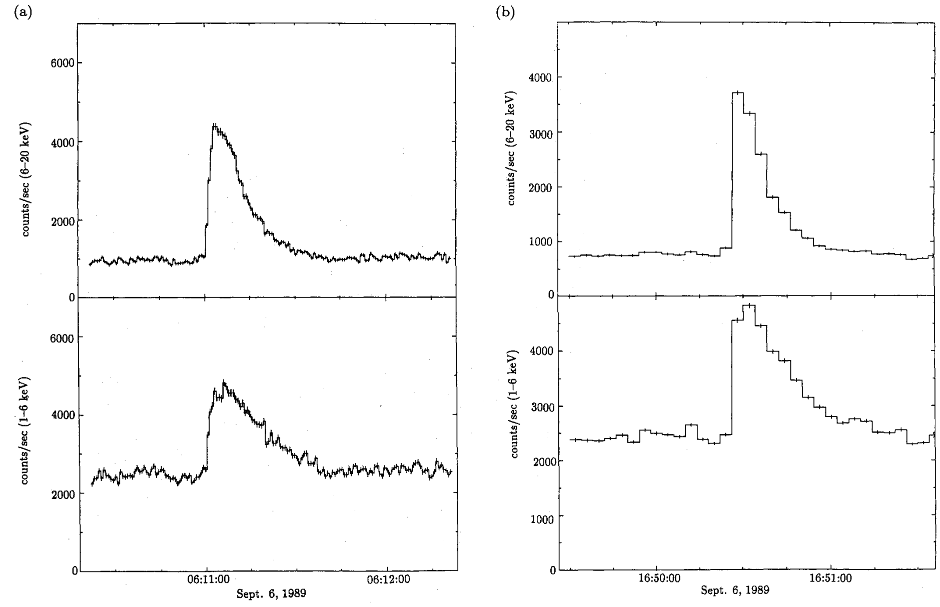

Abbildung 2.4: Lichtkurve von zwei X-Ray Bursts bei GX 13+1 die mit dem Ginga Satelliten beobachtet wurden. Die oberen Bilder zeigen den Energiebereich von $6-20\,\mathrm{keV}$, die unteren $1-6\,\mathrm{keV}$ (Quelle: Matsuba et al., 1995).

2.1.3 Akkretierende Schwarze Löcher

Sterne, die am Ende ihrer Entwicklung eine Masse von mehr als $3\,\mathrm{M}_\odot$, der sogenannten Oppenheimer-Volkov Masse, haben, kollabieren und bilden ein Schwarzes Loch (BH), aus dem keinerlei Strahlung emittiert wird. Die Größe des BHs, der sogenannte Schwarzschildradius, hängt von seiner Masse ab und kann über die Formel

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 3\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{M}_\odot}\,\mathrm{km}$$

beschrieben werden. Befindet sich das BH innerhalb eines Doppelsternsystems, so kann es Materie vom Sekundärstern akkretieren. Aufgrund des Drehimpulses bildet sich auch hier eine Akkretionsscheibe aus. Das erste beobachtete System, welches vermutlich ein BH enthält, war Cygnus X-1 mit einer Primärobjektmasse von $\approx 10-15\,\mathrm{M}_\odot$, welche deutlich über der oberen Massengrenze eines Neutronensterns liegt. In Schwarzloch Doppelsternsystemen können zeitliche Entwicklungen in den Energiespektren beobachtet werden. Dabei wird in sogenannte *hard-* und *soft states*, die im folgenden Abschnitt näher diskutiert werden, unterschieden. Mit kontinuierlichen Langzeitbeobachtungen können die Übergänge zwischen diesen Zuständen, die sich innerhalb eines Tages ereignen, genauer untersucht werden.

Akkretion und spektrale Entwicklung von LMXBs

Low Mass X-Ray Binaries (LMXBs) bei denen der Primärstern ein NS oder BH ist, können Zustände mit unterschiedlichen Energiespektren haben (Barret, 2001). Sowohl beim *soft state* als auch beim *hard state* besteht das Spektrum aus einer weichen Schwarzkörperkomponente aus der Akkretionsscheibe und einer harten Potenzgesetzkomponenten, die wahrscheinlich durch Comptonisierung weicher Photonen in einem heißem Elektronengas erzeugt wird. Während der *soft state* seine größte

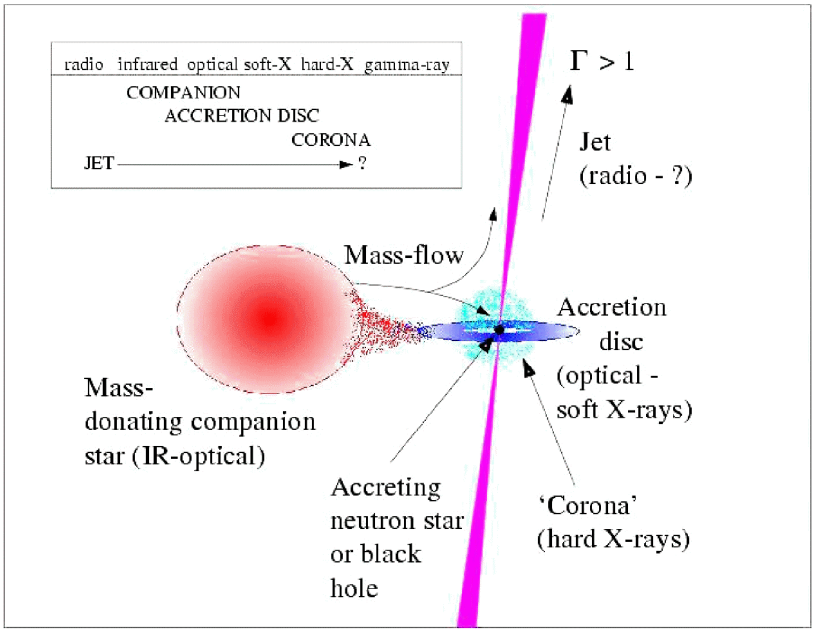

Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Röntgendoppelstern Systems. Oben Links sind die Komponenten angegeben, die die unterschiedlichen Energiebänder dominieren (Quelle: Pottschmidt, 2002).

Leuchtkraft im niederenergetischen Röntgenbereich, bis $\approx 20\,\mathrm{keV}$ besitzt, emittiert der *hard state* Strahlung bis über $100\,\mathrm{keV}$. Der genaue Verlauf eines Überganges von *hard-* und *soft state*, oder umgekehrt, ist bisher noch nicht vollständig erforscht. Im primären Gesichtsfeld von *MIRAX* liegen ≈ 20 LMXBs, an denen eine genaue Untersuchung der spektralen Entwicklung während Zustandsübergängen durchgeführt werden kann.

Relativistische Jets in Microquasaren

Relativistische Jets, d.h. Jets die sich mit beinahe Lichtgeschwindigkeit von ihrer Quelle fortbewegen, kommen sehr häufig bei Supermassiven Schwarzen Löchern, z.B. mit $M \geq 10^7\,\mathrm{M}_\odot$ in Aktiven Galaxien (AGN), vor. Bewegt sich so ein Jet auf den Beobachter zu, so können sogar Vielfache der Lichtgeschwindigkeit, sogenannte *superluminal motions* beobachtet werden (z.B. Giovannini et al., 1999). Seit 1994 konnten solche Jets aber auch in Röntgendoppelsternsystemen beobachtet werden (Mirabel & Rodríguez, 1999). Bisher wurden elf Systeme mit solchen relativistischen Jets beobachtet. Diese Quellen werden auch Mikroquasare genannt, da die beobachteten Jets die gleichen Eigenschaften wie relativistische Jets in AGNs, z.B. Quasare, haben, jedoch ihre Entwicklung sich auf viel kürzeren Zeitskalen abspielt. Während die Entstehung und Entwicklung eines Jets in Mikroquasaren wenige Sekunden bis Tage dauert, liegt diese Zeitspanne bei Galaxien bei Jahren bis Jahrtausenden.

2.2 Beteiligungen

Wie die meisten Satellitenmissionen ist auch *MIRAX* ein sehr stark international orientiertes Projekt. Obwohl diese Mission noch nicht genehmigt wurde, ist eine klare Aufgabenverteilung von entschei-

Tabelle 2.1: Auflistung der teilnehmenden Institute an der *MIRAX* Mission.

Hard X-ray Imager (HXI)	DAS/INPE, CASS/USCD
CZT Detektoren für HXI	CASS/USCD
Soft X-ray Imager (SXI)	SRON
Satellitenbus	DAS/INPE
APS Stern Kamera	ETE/INPE
Flug Computer (CEU)	IAAT, INPE
Zusammenbau, Integration & Test	LIT/INPE
Missionsbetrieb	ETE, CCS/INPE
Start	INPE
Software für Datenreduktion and -verarbeitung	IAAT, MIT, Warwick
Datensicherung and -verteilung	INPE, UCSD, MIT, IAAT

dender Bedeutung. Zur Zeit sind sechs Institute aus fünf verschiedenen Nationen beteiligt. Eine Auflistung der einzelnen Institute und ihr jeweiliger Beitrag ist in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Während das Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) aus Brasilien das gesamte Spacecraft, den Missionsbetrieb, den Start und die Coded Mask beitragen, werden vom Center for Astrophysics & Space Sciences der University of California in San Diego (CASS/UCSD) die dort entwickelten Hard X-Ray Imager (HXI) und von der Space Research Organisation Netherlands (SRON) der Soft X-Ray Imager (SXI) geliefert. Das Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen (IAAT), das Massachussetts Institut of Technology (MIT) und die Universität Warwick entwickeln die Datenverarbeitungssoftware und sind ebenfalls für die Verteilung der gemessenen Daten zuständig. Ein weiterer Beitrag des IAAT ist die Entwicklung eines Flug Computers (Central Electronics Unit = CEU) der neben der Kontrolle der Detektoren auch eine Verarbeitung und Filterung (siehe Kapitel XXX) der vorhanden Detektordaten bereits während des Fluges vornimmt.

2.3 Satellitenplattform und Orbit

Die Satellitenplattform für *MIRAX* ist eine weiterentwickelte Version des Französisch-Brasilianischen Mikrosatelliten (FBM). Das Gesamtgewicht beträgt 200kg, die sich je zur Hälfte auf die Satellitenplattform und die Nutzlast verteilen. Die Gesamtgröße beträgt $\approx 100\,\mathrm{cm} \times 100\,\mathrm{cm} \times 110\,\mathrm{cm}$. Die Gesamtleistung, die durch Solarpanels erzeugt wird, beträgt 250 W. Mit einem kreisförmigen, niedrigen, äquatorialen Orbit in 750 km Höhe, wird eine Umlaufzeit von $\approx 90\,\mathrm{min}$ erreicht, von denen 2/3 der Zeit eine Sicht auf das galaktische Zentrum möglich ist. Die Daten sollen einmal pro Orbit, während einer zehnminütigen Kontaktperiode, mit einer Übertragungsrate von $> 400\,\mathrm{kbps}$ heruntergeladen werden.

2.4 Instrumente

Auf *MIRAX* sollen zwei unterschiedliche Instrumente für die kontinuierliche Beobachtung des galaktischen Zentrums im Röntgenbereich eingesetzt werden. Sowohl der Soft X-Ray Imager (SXI), der im niederenergetischen Bereich von 2 bis 28 keV empfindlich ist, als auch die beiden Hard X-Ray Imager (HXI), mit einem Energiebereich von 20 bis 200 keV, beruhen auf dem Coded Mask Prinzip, auf das

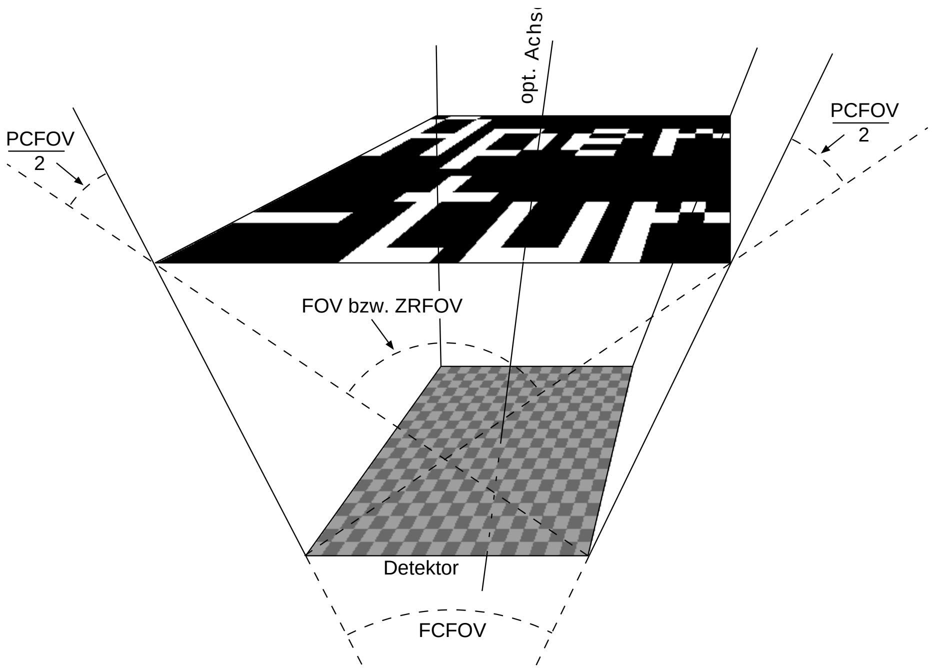

Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines Coded Mask Teleskopes. Deutlich sind die Bereiche des *fully coded field of view* und des *partially coded field of view* erkennbar (Quelle: Groeneveld, 1999).

im folgenden Abschnitt noch einmal genauer eingegangen wird.

2.4.1 Coded Mask Teleskope

Ein Coded Mask Teleskop (CMT) besteht aus einer Absorptionsmaske, der sogenannten Aperturmaske, welche einen Schatten des eintreffenden Photonenstroms auf einen positionsempfindlichen Detektor projiziert (Abbildung 2.6). Die Aperturmaske besteht aus einem für Röntgenstrahlung undurchlässigen Material, meistens Wolfram, in die ein Aperturkode, d.h. ein Lochmuster, eingearbeitet ist, so daß die Richtung der einfallenden Röntgenstrahlung eindeutig bestimmt werden kann. Für den Aperturkode gibt es eine große Anzahl an möglichen Geometrien, die ausführlicher von Groeneveld (1999) beschrieben werden. Um die genaue Position und den Fluß der Quelle zu bestimmen, muß das detektierte Bild durch eine Dekodierungsfunktion, z.B. mithilfe einer Kreuzkorrelation, zurückgerechnet werden. Die Größe des Gesichtsfeldes (*field of view* = FOV) hängt sehr stark vom Design des Coded Mask Teleskopes ab. Liegt eine Quelle im *fully coded field of view* (FCFOV), so beleuchtet sie die gesamte Detektorfläche. Liegt sie dagegen im *partially coded field of view* (PCFOV), so kann sie nur von einem Teil der Detektorfläche detektiert werden (Abbildung 2.6). Wenn die Quelle sich am äussersten Rand des PCFOV befindet, so wird nur ein sehr kleiner Teil der Aperturmaske auf den Detektor abgebildet, was zur Bildung von Artefakten, d.h. Quellen die an falscher Position dargestellt werden, führt. Oft wird bei den Spezifikationen eines Instrumentes das FOV (*full width at half maximum* = FWHM) angegeben. Dies bedeutet, daß 50 % der bestrahlten Detektorfläche einer Quelle detektiert werden kann. Die Transmission der Aperturmaske beträgt in der Regel 50 %, jedoch kann sie, je nach Anwendung, davon abweichen (in ’t Zand, Heise & Jager, 1994).

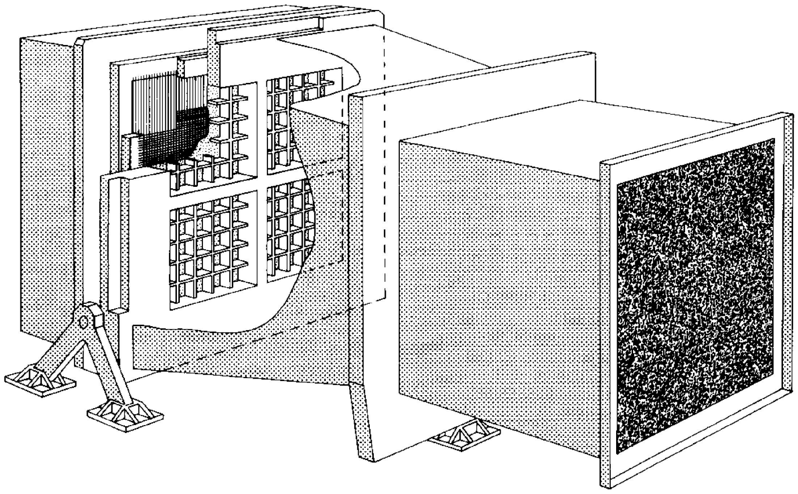

Abbildung 2.7: Die Wide Field Camera von BeppoSAX dient als Soft X-Ray Imager auf *MIRAX* (Quelle: Jager et al., 1997)

2.4.2 Soft X-Ray Imager

Der für *MIRAX* geplante Soft X-Ray Imager (SXI) ist das Ersatzmodul der Wide Field Camera (WFC) des italienisch/niederländischen Satelliten BeppoSAX (Jager et al., 1997). Das Teleskop besteht aus einer Coded Mask und einem Vieldrahtproportionalzähler als Detektor (Abbildung 2.7). Eine genauere Erläuterung zum Vieldrahtproportionalzähler kann im folgenden Kapitel oder in der gängigen Literatur, z.B. Knoll (1999), nachgelesen werden. Die Aperturmaske besteht aus 0.1 mm dickem Edelstahl mit einer $2\,\mu$m Goldbeschichtung auf beiden Seiten. Der Aperturkode besteht aus einem Muster aus 256×256 Elementen. Das Lochmuster ist ein sogenannter *triadic code* (in 't Zand, Heise & Jager, 1994) mit einer Durchlässigkeit von 33 % für Röntgenstrahlung.

Die Größe des Detektors und der Maske beträgt $25{,}5 \times 25{,}5\,\mathrm{cm}^2$ bzw. $25{,}6 \times 25{,}6\,\mathrm{cm}^2$. Das bedeutet, daß die Anordnung nur einen kleinen FCFOV besitzt. Das FOV FWHM entspricht $20^\circ \times 20^\circ$. Die Winkelauflösung des Detektors beträgt $5'$ (FWHM) bei einem Abstand von 0.7 m zwischen Aperturmask und Detektor. Dies erlaubt eine Quellenlokalisation mit einer Genauigkeit von $1'$. Der hier verwendete Vieldrahtproportionalzähler hat einen Energiebereich von $1.8 - 28\,\mathrm{keV}$ mit einer Energieauflösung von etwa 20 % bei 6 keV. Mit diesem Detektor lassen sich Quellen mit einem Fluß von wenigen mCrab bis hin zu einigen Crab beobachten.

2.4.3 High X-Ray Imager

Auf *MIRAX* sollen zwei High X-Ray Imager (Abbildung 2.8) eingesetzt werden, um die gesamte galaktische Ebene kontinuierlich beobachten zu können. Eine leicht zueinander verkippte Anordnung ermöglicht eine gesamtes FOV mit FWHM von $45.8^\circ \times 22.9^\circ$. Ein einzelner High X-Ray Imager (HXI) besteht aus einer Coded Mask und einem Array aus 9 Detektoren mit einer Fläche von $360\,\mathrm{cm}^2$. Die Coded Mask besteht aus Wolfram mit einer 157×157 Pixel *Modified Uniformly Redundant Array* (MURA; Gottesman & Fenimore, 1989) Kodierung und einer Durchlässigkeit von 50%. Ein Detektormodul bestehen aus 4 einzelnen Cadmium-Zink-Tellur Crossed Strip Detektoren (CZT Detektoren)

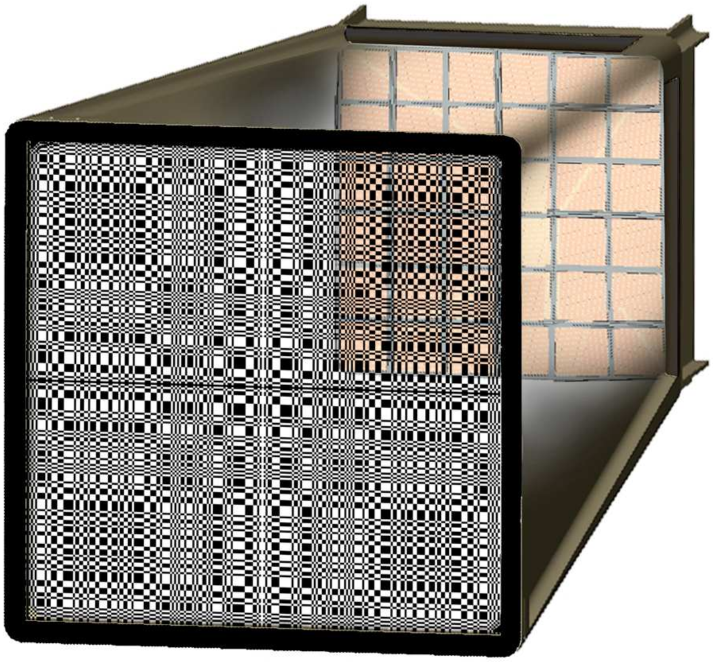

Abbildung 2.8: Der High X-Ray Imager mit einem Detektorarray aus 3×3 Modulen 76 cm hinter der Coded Mask.

die jeweils $32 \times 32 \times 2\,\mathrm{mm}^3$ groß sind, so daß eine Gesamtdetektorfläche von $\approx 41\,\mathrm{cm}^2$ entsteht. Der Energiebereich liegt zwischen 10 keV und 200 keV mit einer Energieauflösung von $< 8\,\%$ bei 60 keV. Eine allgemeine Übersicht der in der Röntgenastronomie verwendeten Detektoren wird in Kapitel 3 gegeben.

2.4.4 Central Electronics Unit

Die *Central Electronics Unit* (CEU) ist die Kommunikationsverbindung zwischen den Detektoren und der Satellitenplattform. Da bei den SXI keine großen Änderungen vorgenommen werden, muß die CEU alle Detektorkommandos von der Bodenstation auf das bei BeppoSAX verwendete Format transformieren und weiterleiten. Die CEU unterteilt sich in zwei seperate Einheiten, einen Event Pre-Prozessor (EPP), auf den in Kapitel 3 näher eingegangen wird, und eine Data Processing Unit (DPU) die für die Telemetriepakete und Satellitenkommandos zuständig ist. Der EPP empfängt die Daten aus dem Detektor und führt notwendige Datenkorrekturen und -reduktionen durch. Diese korrigierten Daten werden von der DPU weitergeleitet und in einem 128 MB On-Board Speicher bis zur Telemetrie an die Bodenstation gesichert. Für die Telemtrie ist eine zehnminütige S-Band Verbindung mit der bereits erwähnten Übertragungsrate von $> 400\,\mathrm{kbs}$ vorgesehen. Der On-Board Speicher hat genug Platz für Daten von drei Orbits, so daß bei einem mißglückten Kontakt die Daten nicht verloren gehen.

Kapitel 3

Eine kleine Detektorlehre

Wie bereits in Abschnitt 2.4.3 erwähnt wurde, wird beim *High X-Ray Imager* von *MIRAX* ein Cadmium Zink Tellur (CZT) Crossed Strip Detektor benutzt. In diesem Kapitel soll eine kurzer, allgemeiner Überblick über die aktuell verwendeten Detektorarten und ihre möglichen Anwendungsgebiete gegeben werden.

3.1 Detektoren

In der Röntgenastronomie werden eine Vielzahl von unterschiedlichen Detektoren, einzeln oder kombiniert, eingesetzt. In den folgenden Abschnitten werden die bekanntesten und wichtigsten Detektorarten vorgestellt und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert. Diese Aufzählung ist bei weitem nicht vollständig, da noch eine Vielzahl weiterer Detektoren existiert und eine genaue Auflistung den hier vorhandenen Rahmen sprengen würde. Die hier benutzten Zahlenwerte und Abbildungen sind, falls nicht anders angegeben, aus Knoll (1999).

3.1.1 Allgemeines

Um Detektoren miteinander vergleichen zu können, müssen gemeinsame Eigenschaften definiert werden. Diese Eigenschaften sollten möglichst in allen Detektoren vorhanden sein. Die wichtigsten Vergleichskriterien werden in diesem Abschnitt definiert und erläutert.

Effizienz

Idealerweise sollte ein einfallendes Photon seine gesamte Energie im Detektor deponieren. Bei hochenergetischer Strahlung kann es aufgrund des geringen Wirkungsquerschnittes vorkommen, daß die Photonen den Detektor durchdringen und somit nicht detektiert werden. Die Effizienz ε eines Detektors lässt sich mit

$$\varepsilon = \frac{\text{Gemessene Photonen}}{\text{auf Detektorfläche einfallende Photonen}}$$

beschreiben. Die Effizienz hängt stark vom verwendeten Material, der eingestrahlten Energie und der Dicke des Detektors ab.

Energieauflösung

Eine gute Energieauflösung ist vor allem bei der Spektroskopie, bei der die gemessene Intensität über der Energie aufgetragen wird, unerlässlich. Die Energieauflösung der jeweiligen Detektoren kann

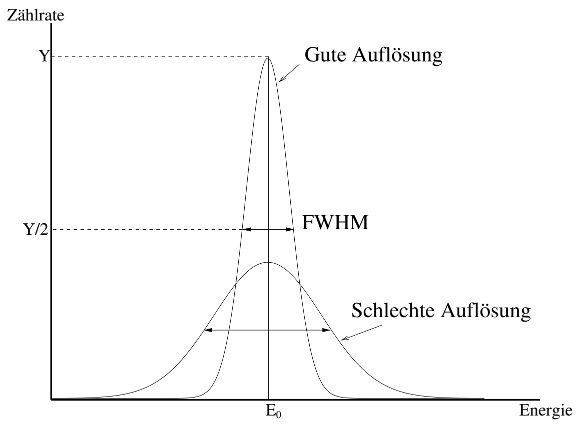

Abbildung 3.1: Definition der Energieauflösung eines Detektors. FWHM$/E_0$ ist die relative Breite der Verteilung. Bei geringeren Zählraten oder schlechterer Auflösung wird der Fehler der Messung größer.

mithilfe einer monoenergetischen Quelle, z.B. einer Röntgenröhre oder einer Eichquelle, ermittelt werden. Die Breite des gemessenen Peaks gibt die Auflösung des Detektors wieder. Bei konstanter Linienstrahlung wird aufgrund von statistischen Fluktuationen im Detektor eine gaussförmige Verteilung der Meßwerte um den tatsächlichen Energiewert gemessen (Abbildung 3.1). Die Breite auf halber Höhe des Maximums, die auch *full width at half maximum* (FWHM) genannt wird, gibt, geteilt durch den tatsächlichen Energiewert (E_0), die relative Energieauflösung für diesen Energiewert an. Je kleiner dieser Wert ist, desto besser ist die Energieauflösung. Die beste erreichbare Auflösung ist

$$\frac{\Delta E}{E} = 2.35\sqrt{\frac{F}{N}}$$

wobei $2.35 \cdot \sqrt{1/N}$ aus der Poissonverteilung der Anzahl der primären Ladungsträger, die vom einfallenden Photon erzeugt werden, stammt und F, der sogenannte Fano-Faktor, eine Korrektur der Poissonstatistik darstellt.

Totzeit

Zwei hintereinander eintreffende Ereignisse müssen einen zeitlichen Mindestabstand haben, um sie eindeutig voneinander unterscheiden zu können. Dieser Mindestabstand, allgemein auch als Totzeit bezeichnet, wird normalerweise durch Einschränkungen der Ausleseelektronik, z.B. Auslese- und Verarbeitungszeit, oder auch durch detektorabhängige Grenzen, z.B. Ladungsabbau innerhalb des Detektors, vorgegeben. Bei sehr großen Zählraten kann die Totzeit zu einer sehr starken Erniedrigung der Zählrate führen. Um den Einfluß der Totzeit auf die Meßdaten zu kompensieren, können die gemessenen Zählraten anhand von unterschiedlichen Modellen auf die tatsächlichen Flüsse zurückgerechnet werden. Dafür muß das Verhalten der Detektormaterialien und der verwendeten Elektronik für die jeweilige Anwendung genauestens bekannt sein.

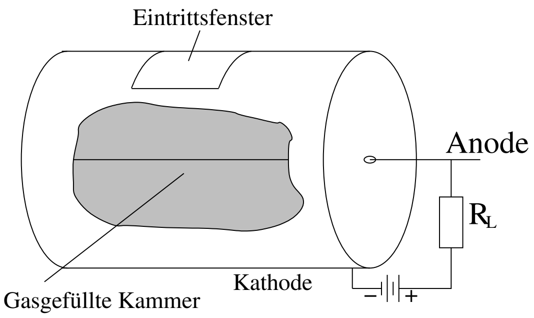

Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau eines Proportionalzählers.

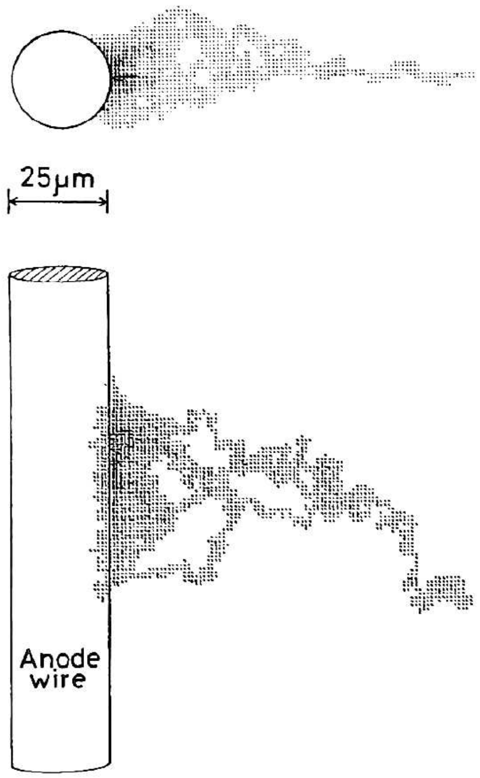

Abbildung 3.3: Zwei Ansichten von Monte Carlo Simulationen einer durch ein einzelnes Elektron ausgelösten Elektronenlawine an einem einzelnen Anodendraht (Quelle: Knoll, 1999, aus Matoba et al. 1985).

Ortsauflösung

Damit der Auftreffort des einfallenden Photons bestimmt werden kann, muß ein Detektor eine Ortsauflösung besitzen. Beispielsweise ist bei einem Pixeldetektor die Größe der einzelnen Pixel der limitierende Faktor, um den Auftreffort wiederzugeben. Wird ein Photon, genauer die von ihm erzeugten Ladungsträger, in zwei oder mehreren benachbarten Pixeln gleichzeitig gemessen, so kann durch die Bestimmung des Schwerpunktes der Ladungswolke eine genauere Ortsbestimmung durchgeführt werden. Bei Vieldrahtproportionalzählern und Crossed Strip Detektoren werden unabhängig voneinander X- und Y-Richtung bestimmt. Die Ortsauflösung ist durch den Abstand der einzelnen Anoden/Kathoden untereinander begrenzt. Auch hier kann eine bessere Ortsauflösung anhand des Schwerpunktes der Ladungswolke bestimmt werden.

3.1.2 Proportionalzähler

Proportionalzähler, wie auch Geiger-Müller-Zähler, bestehen aus einer gasgefüllten Kammer, deren Wand als Kathode dient, und einem Anodendraht (Abbildung 3.2). Ein einfallendes Photon erzeugt durch Wechselwirkung mit dem Füllgas ein primäres Elektron-Ion-Paar. Das primäre Elektron verteilt seine Energie durch Ionisation auf mehrere sekundäre Elektronen. Durch eine angelegte Hochspan-

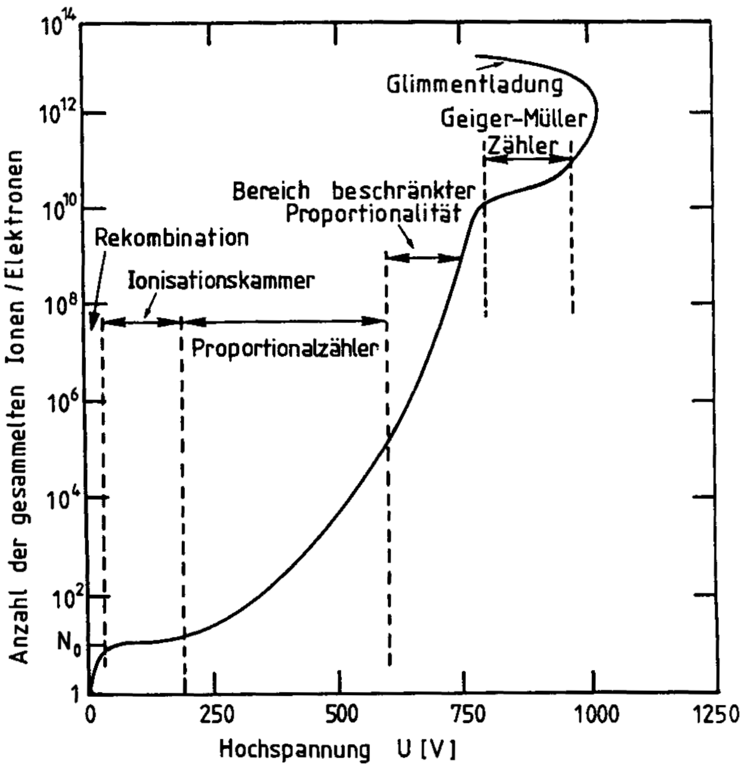

Abbildung 3.4: Hochspannungsbereiche in denen Proportionalzähler und Geiger-Müller-Zähler arbeiten (Quelle: Grupen, 1993).

nung werden die ELektronen zur Anode hin beschleunigt. Erreichen die Elektronen dabei die Ionisierungsenergie der Gasmoleküle, werden durch Stöße an neutralen Molekülen weitere Elektronen-Ionen-Paare erzeugt, die sich dann ebenfalls in Richtung Anodendraht bewegen (Abbildung 3.3). Das Füllgas kann je nach Einsatzgebiet variieren. Vorzugsweise werden Edelgase eingesetzt, denen ein kleiner Anteil von sogenanntem *quenching gas* beigemischt ist. Bei Abstrahlung von UV-Licht, das beim Wechsel eines angeregten Füllgasatomes in einen energetisch günstigeren Zustand entsteht, werden weitere Elektronenlawinen ausgelöst. Das *quenching gas* kann diesem Effekt durch Absorption der UV-Photonen entgegenwirken, so daß die Totzeit von Proportionalzählern bis auf $< 1\mu$s erniedrigt werden kann. Im Gegensatz zum Geiger-Müller-Zähler wird beim Proportionalzähler mit kleineren Spannungen gearbeitet, so daß eine Energiebestimmung der einfallenden Strahlung möglich ist (Abbildung 3.4). Jedoch ist die moderate Energieauflösung von bestenfalls 15% bei 5.9 keV und der maximale Energiebereich bis etwa 100 keV, der sehr stark abhängig von der Art und dem Druck des Füllgases ist, ein Nachteil gegenüber anderen Detektoren. Dennoch sind großflächige Proportionalzähler zur Beobachtung von Objekten, die Zeitvariabilität auf kurzen Zeitskalen zeigen, sehr gut geeignet. Solche Detektoren wurden als *Proportional Counter Array* (PCA) auf dem *X-Ray Timing Explorer* (XTE) Satelliten eingesetzt (Jahoda et al., 1996).

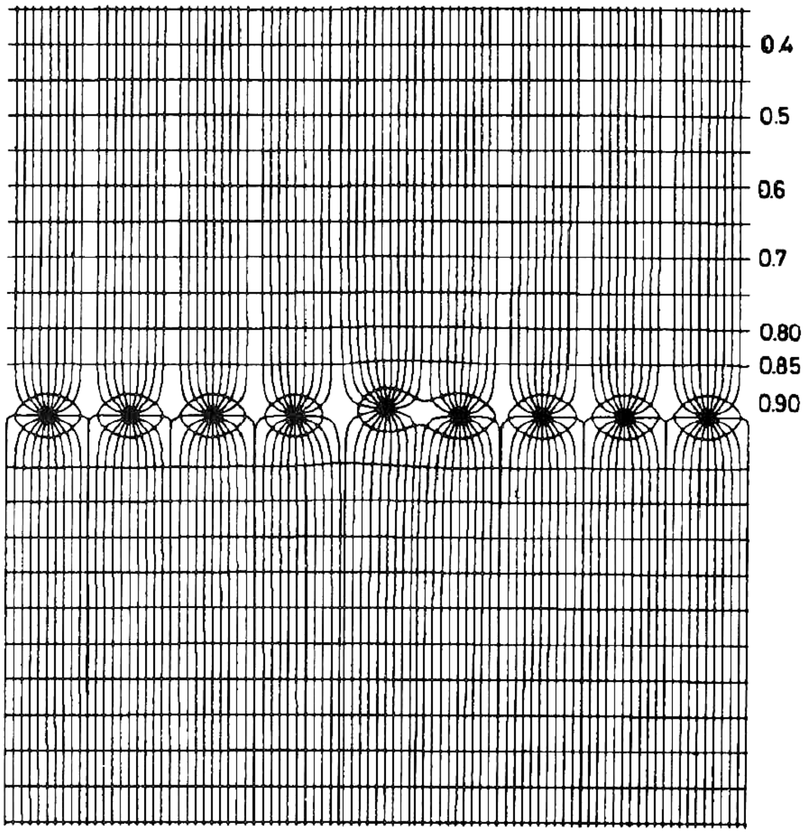

Abbildung 3.5: Potential eines Vieldrahtproportionalzählers. Die angegebenen Zahlen geben die prozentuale Spannung der Äquipotentiallinien wieder (Quelle: Knoll, 1999, aus Charpak & Sauli 1979).

3.1.3 Vieldrahtproportionalzähler

Da ein einzelner Andodendraht nur eine sehr kleine Sammelfläche besitzt, wurden sogenannte Vieldrahtproportionalzähler entwickelt, bei denen die Anodendrähte eng aneinander in einer parallelen Anordnung liegen. Somit wird ein gleichförmig abfallendes Potential über einen großen Detektorbereich gebildet (Abbildung 3.5). Mit einer kreuzförmigen Anordnung von zwei solchen Anodengittern ist eine 2-dimensionale Ortsbestimmung des wechselwirkenden Teilchens oder Photons möglich. Jedoch kann der Abstand zwischen den einzelnen Anoden nicht beliebig klein sein ($\approx 1\,\mathrm{mm}$), da sich ansonsten die Anoden gegenseitig beeinflussen würden. Auf ROSAT wurden diese Detektoren als sogenannter *Position Sensitive Proportional Counter* (PSPC) verwendet (Briel & Pfeffermann, 1985).

3.1.4 Szintillatoren

Szintillatoren absorbieren ionisierende Strahlung und erzeugen dabei Lichtblitze, deren Intensität mit einem Photomultiplier oder mit Photodioden gemessen werden kann. Der Energiebereich, in dem Szintillatoren empfindlich sind liegt, je nach eingesetztem Material, zwischen einigen keV bis hin zu mehreren MeV, so daß eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten für diese Art von Detektor möglich ist. Es werden zwei Hauptarten von Szintillatoren unterschieden, organische und anorganische. Diese können noch in viele weitere Unterarten, wie z.B. Gas-, Flüssig- oder Polymerszin-

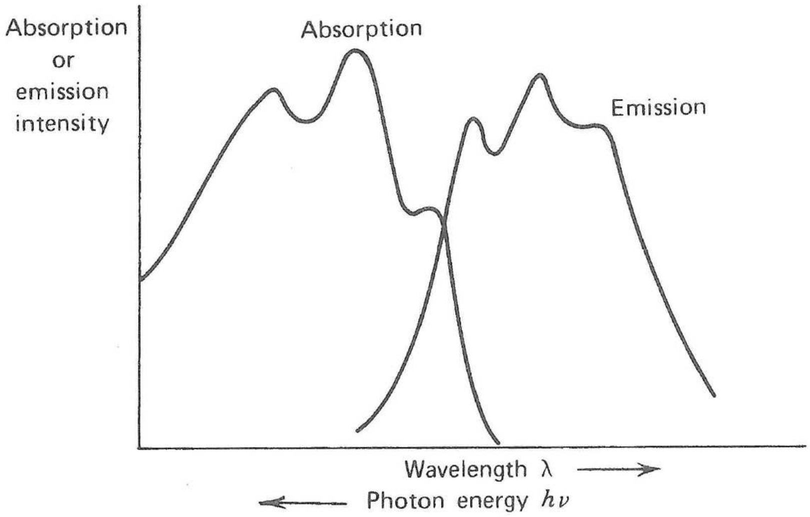

Abbildung 3.6: Beispiel von Absorptions- und Emissionsenergien bei Einsatz eines *waveshifters* (Knoll, 1999).

tillatoren, abhängig vom verwendeten Material und Aggregatzustand, aufgeteilt werden. In diesem Abschnitt werden die Haupteigenschaften der organischen und anorganischen Szintillatoren sowie mögliche Auslesetechniken vorgestellt.

Organische Szintillatoren

Bei organischen Szintillatoren wird der Fluoreszenzprozeß durch Übergänge von Elektronen zwischen unterschiedlichen Energieniveaus eines einzelnen Moleküls hervorgerufen. Dabei kann der Szintillator, je nach benötigtem Anwendungsgebiet, unterschiedliche Aggregatzustände besitzen. Die Effizienz eines Szintillators kann durch Übergänge beeinträchtigt werden, die kein sichtbares Licht erzeugen, sondern in Wärmestrahlung oder Gitterschwingungen übergehen. Einen weiteren negativen Einfluß auf die Effizienz haben Absorptions- und Emissionsvorgänge, die sich zwischen den einzelnen Molekülen abspielen und somit nicht vom Photomultiplier detektiert werden können. Dies kann unterdrückt werden, indem ein sogenannter *waveshifter* hinzugefügt wird, mit dem die erzeugten Photonen zu einer längeren Wellenlänge, und damit zu geringeren Energien hin, verschoben werden, so daß eine weitere Absorption nicht mehr möglich ist (Abbildung 3.6). Plastikszintillatoren werden sehr häufig als Antikoinzidenzschild für andere Detektoren verwendet, um hochenergetische Teilchen, die seitlich oder von hinten auf den Detektor treffen, abzuschirmen.

Anorganische Szintillatoren

Anorganische Szintillatoren bestehen aus kristallinen Strukturen die denen der Halbleiter, auf die in Abschnitt 3.1.5 noch genauer eingegangen wird, sehr ähnlich sind. Der Szintillationsmechanismus in anorganischen Materialien ist vergleichbar mit dem der organischen, jedoch wird hier zur Veranschaulichung das Bändermodell des Atomgitters verwendet. Ein durch die einfallende Strahlung angeregtes Elektron geht durch Abgabe eines Photons in einen energetisch tieferen Zustand über. Die Wellenlänge des emittierenden Photons hängt dabei von den Abständen der Energiebänder zueinander ab. Da die Bandlücke der meisten Materialien zu groß ist, um Photonen im optischen Bereich zu erzeugen, werden Fremdatome, sogenannte Aktivatoren, zur Verkleinerung der Bandlücke eingebracht. Einer der Vorteile von anorganischen gegenüber organischen Szintillatoren ist, daß die gemessene Intensität, in Abhängigkeit von der Energie ein lineares Verhalten über einen größeren Energiebereich besitzt. Sehr beliebt sind dabei sogenannte Phoswich-Detektoren, die aus zwei Schichten von Szintillatoren bestehen, die direkt miteinander verklebt sind. Durch diesen Aufbau lässt sich die vordere Szintillatorschicht sehr gut gegen Strahlung von hinten abschirmen. Durch unterschiedliche Abklingzeiten der Signale in den verwendeten Materialien, lässt sich bei hochenergetische Photonen unterscheiden, ob sie von vorne oder von hinten in den Detektor eingedrungen sind. Solche Detektoren sind auf dem *Rossi X-Ray Timing Explorer* RXTE als *High Energy X-Ray Timing Experiment* (HEX-TE) (Rothschild et al., 1998) und auf der MIR-Station als HEXE verwendet worden (Reppin et al., 1985).

Auslesen

Da Szintillatoren nur schwache Lichtblitze erzeugen, muß für das Auslesen eine Meß- und Verstärkungselektronik angebunden werden, die die Lichtblitze in ein meßbares elektronisches Signal umwandelt. Dafür werden vorwiegend Photomultiplier (Abbildung 3.7) benutzt. Mit einer Reihung von Kathoden, den sogenannten Dynoden, an denen eine ansteigende Spannung angelegt wird, läßt sich das Signal verstärken. Die einfallende Strahlung erzeugt an der Photokathode ein Photoelektron, das auf die erste Dynode beschleunigt wird und beim Auftreffen mehrere Elektronen auslöst. Diese werden durch das elektrische Feld zur zweiten Dynode beschleunigt und erzeugen dort ebenfalls jeweils mehrere Elektronen. Durch diesen Kaskadeneffekt nimmt die Anzahl der so entstandenen Elektronen, und somit die Signalstärke, sehr stark zu und kann dann an einer Anode ausgelesen werden. Neben den Photomultipliern wurden in den letzten Jahren auch Halbleite-Photodioden, auf die weiter unten nochmals eingegangen wird, zur Messung der Lichtsignale eingesetzt. Die großen Vorteile dieser Dioden sind der geringere Platz- und Leistungsverbrauch im Vergleich zu Photomultipliern. Auch wird bei den Dioden keine Hochspannung benötigt, so daß sich der elektronische Aufwand ebenfalls verringert.

Szintillatoren sind zwar aufgrund ihres großen Energiebereiches sehr vielseitig einsetzbar, jedoch ist die Energieauflösung für die Spektroskopie, im Vergleich mit anderen Detektoren, schlechter. Die Auflösung hängt natürlich auch von den jeweils benutzten Photomultipliern ab, und beträgt bestenfalls $\approx 15\,\%$ bei $60\,\mathrm{keV}$.

3.1.5 Halbleiterdetektoren

Halbleiterdetektoren zeigen bei der Detektion von Röntgenstrahlung sehr gute Eigenschaften bei der Energieauflösung und der Totzeit. Um einen effizienten Halbleiterdetektor zu bauen, werden Fremdatome in das Halbleitermaterial, wie z.B. Si, Ge, usw., eingesetzt, so daß sich eine Anreicherung (n-Dotierung) bzw. Verarmung (p-Dotierung) der Elektronen ergibt. Werden nun diese p- und n-dotierten Halbleiter zusammengebracht, so bildet sich eine Verarmungszone (Depletionszone) aus, die das eigentliche Detektorvolumen bestimmt. Wie bei den oben erwähnten Photodioden werden die Elektronen-Loch-Paare (EL-Paare) gemessen, die bei einem einfallenden Photon entstehen (siehe Abbildung 3.8). Da die Bandlücke bei Halbleitern ungefähr $1-2\,\mathrm{eV}$ beträgt, und somit viel geringer ist als bei Proportionalzählern oder Szintillatoren, wird eine größere Anzahl an primären Ladungsträgern erzeugt und dadurch eine deutlich bessere Energieauflösung erreicht (siehe Abbildung 3.9). Im Gegensatz zu Gasen oder Flüssigkeiten haben Festkörper eine größere Dichte, so daß die vollständige

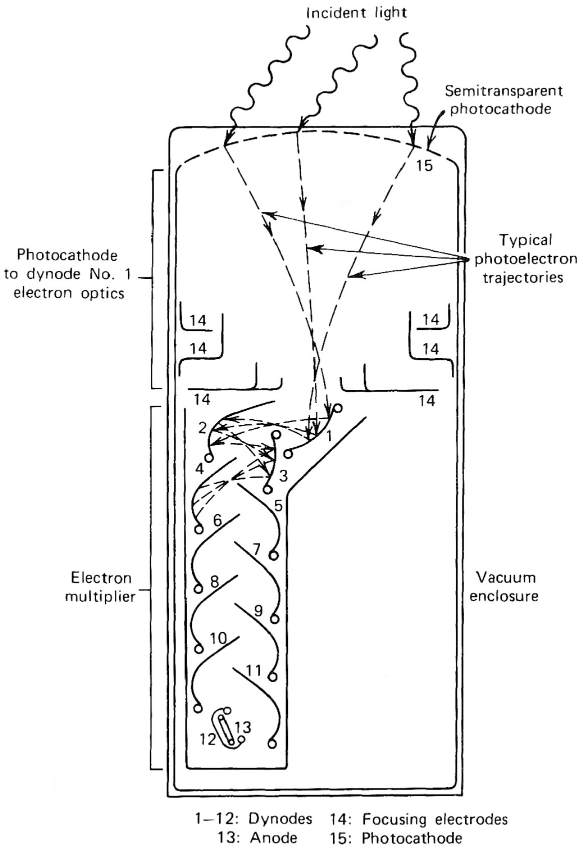

Abbildung 3.7: Aufbau eines Photomultipliers mit den wichtigsten Komponenten (Knoll, 1999).

Absorption bereits in vergleichsweise dünnen Detektoren erfolgen kann. Werden sehr dünne Detektoren verwendet, kann der sensitive Energiebereich nach oben eingeschränkt werden, da die hochenergetische Strahlung den Detektor vollständig durchdringt. Ein sehr einflußreicher Faktor für die Energieauflösung ist die Elektronenmobilität, die angibt wie weit sich ein Elektron in einem Material bewegen kann bevor es rekombiniert. Im folgenden sollen die am häufigsten verwendeten Materialien und ihre jeweiligen Eigenschaften, sowie unterschiedliche Detektoranordnungen vorgestellt werden.

Silizium

Mit einer Ordnungszahl von $Z = 14$ und einer Dichte von $2.33\,\mathrm{g/cm^3}$ gehört Silizium (Si) zu einem der leichtesten Halbleitermaterialien. Die Bandlücke beträgt 1.165 eV bei 0 K und 1.115 eV bei 300 K (Zimmertemperatur) und die Energie zur Erzeugung eines EL Paares ist 3.62 eV bei 77 K bzw. 3.62 eV bei 300 K. Deswegen sollte der Si-Detektor während des Betriebes gekühlt werden, da bei zu hohen Temperaturen thermisches Rauschen, das heißt eine spontane EL-Paarbildung, die durch die thermische Bewegung der Elektronen in der Gitterstruktur erzeugt wird, die Messung beeinflußt.

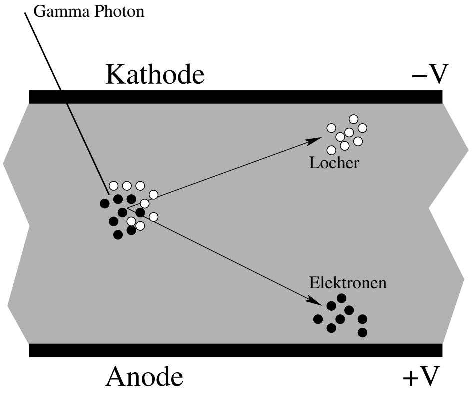

Abbildung 3.8: Erzeugung von Elektronen (schwarz) und Löchern (weiß) in einem Halbleiter. Durch Anlegen einer Spannung werden diese getrennt und über Anoden und Kathoden ausgelesen.

Germanium

Germanium (Ge) besitzt eine Ordnungszahl von $Z = 32$, eine Dichte von $5.33\,\mathrm{g/cm^3}$ und hat damit einen deutlich größeren Wirkungsquerschnitt als Si. Dadurch kann Ge, bei gleicher Dicke, Photonen mit höheren Energien detektieren. Neben den anorganischen Szintillatoren ist Ge einer der wichtigsten Detektoren im Energiebereich bis mehrere 100 keV. Mit einer Bandlücke von nur 0.746 eV (0 K) bzw. 0.655 eV (300 K) und einer benötigten Energie von 2.96 eV (77 K) ist das thermische Rauschen jedoch größer als bei Si, weswegen Ge-Detektoren nur gekühlt betrieben werden können. Flüssiger Stickstoff, mit dem eine Temperatur von $\approx 77\,\mathrm{K}$ erreicht werden kann, ist eine der kostengünstigsten und bevorzugten Möglichkeiten die verwendet werden. Germaniumdetektoren werden z.B. beim Spectrometer für INTEGRAL (SPI) eingesetzt (Lichti et al., 1996).

Cadmium-Tellur

Cadmium-Tellur (CdTe), mit einer Ordnungszahl von $Z = 48$ (Cd) bzw. $Z = 52$ (Te) und einer Dichte von $6.06\,\mathrm{g/cm^3}$, ist ein sogenannter Mischhalbleiter, da er aus einer Verbindung von mehreren Materialien besteht. Durch die größeren Dichten ist der photoelektrische Absorptionskoeffizient größer als bei Ge, was zu einer größeren Effizienz, bei gleicher Dicke, führt. Dies erlaubt eine Anwendung als Halbleiterdetektor bis in den MeV Bereich (Abbildung 3.10). Obwohl die Energie, die zur Erzeugung eines EL-Paares benötigt wird, 1.52 eV beträgt, sollte der Detektor auf $\approx -30°\mathrm{C}$ Betriebstemperatur gekühlt werden um die beste Energieauflösung und Effizienz zu erhalten. Da aufgrund der geringeren Elektronenmobilität die Energieauflösung schlechter ist als bei Si oder Ge, werden diese Detektoren vorwiegend wegen ihres großen Energiebereiches und der geringen notwendigen Kühlung eingesetzt. Detektoren mit gleichbleibenden Eigenschaften über die ganze Detektorfläche sind nur sehr schwer herstellbar, weswegen die Größe zur Zeit auf wenige mm in der Dicke und einige cm in der Länge beschränkt ist. Auf INTEGRAL wird ein CdTe Detektor Array als Teil des IBIS Detektors, *Imager On-Board Integral Satellite*, verwendet (Ubertini et al., 2003).

Cadmium-Zink-Tellur

In den letzten Jahren wurde anstatt CdTe eine Verbindung aus CdTe mit Anteilen von Zink-Tellur (ZnTe) benutzt. Da Zink eine geringere Ordnungszahl (30) besitzt, wird die Dichte zwar erniedrigt,

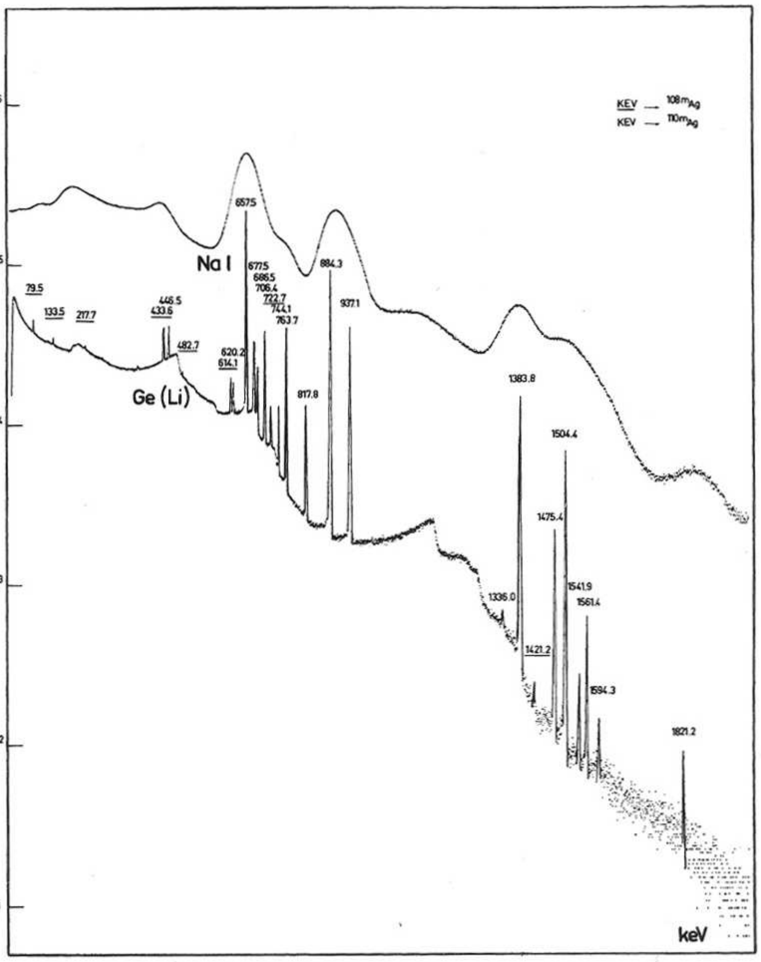

Abbildung 3.9: Vergleich der Energieauflösung von einem NaI-Szintillator und einem Ge(Li) Halbleiterdetektor. Die hier verwendetent Quellen sind ^{108}Ag und ^{110}Ag. Die Energiewerte in keV sind an den einzelnen Peaks angegeben (Quelle: Knoll, 1999, aus Philippot 1970).

jedoch wird die Bandlücke auf 1.64 eV erhöht. Die Konzentration des Zinks in dieser Zusammensetzung beträgt in der Regel zwischen 4 % und 20 %. Dies erlaubt einen Einsatz in einem Energiebereich wie beim CdTe, jedoch kann bei Raumtemperatur gearbeitet werden. Eine genauere Diskussion über die CZT Detektoren, die bei *MIRAX* und Constellation-X geplant sind, findet in Kapitel 5.1.1 statt.

3.2 Unterschiedliche Detektoranordnungen

Um mehrere Röntgenquellen im Gesichtsfeld voneinander unterscheiden zu können, muß ein Detektor eine entsprechende Ortsauflösung besitzen. Neben den Vieldrahtproportionalzählern können Halbleiterdetektoren die besten Ortsauflösungen erreichen. Da dies stark von der Anordnung der jeweiligen Elektroden abhängt, werden in diesem Abschnitt unterschiedliche Elektrodenanordnungen vorgestellt.

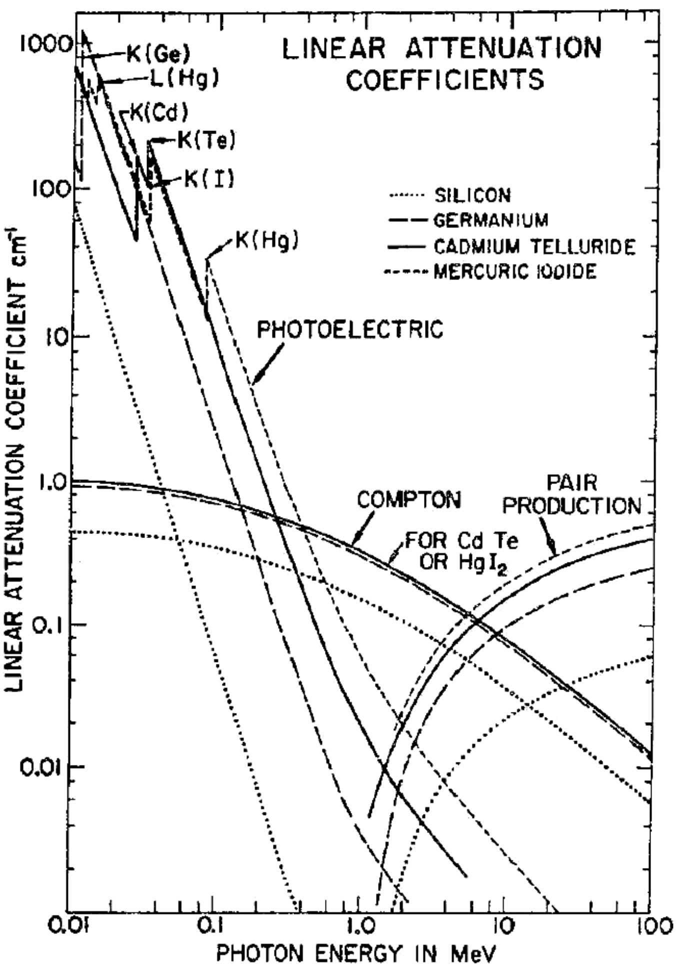

Abbildung 3.10: Linearer Absorptionskoeffizient für Photoabsorption, Comptoneffekt und Paarbildung in einem Energiebereich von 10 keV bis 100 Mev (Quelle: Knoll, 1999, aus Malm 1972).

3.2.1 Flächen- oder Pixel-Detektoren

Eine der einfachsten Arten, den Ort eines eintreffenden Photons zu bestimmen, ist eine Trennung und individuelle Verarbeitung von einzelnen Pixeln. Dazu werden die Elektroden ähnlich einem Schachbrettmuster angeordnet, so daß zwischen ihnen kein direkter Kontakt besteht. Jede einzelne Elektrode wird über eine sogenannte *Bump*-Verbindung mit dem Auslesechip verbunden (Abbildung 3.11). Die erreichbare Pixelgröße liegt dabei bei einigen zehn μm. Obwohl Auslesechip und Detektor beide aus dem gleichen Halbleitermaterial bestehen können, wird auf eine gemeinsame Struktur beider Komponenten auf einem Stück Halbleiter verzichtet. Während einerseits hohe Widerstände und geringe Temperaturen bei den Detektoren benötigt werden, arbeiten die Schaltkreise des Auslesechips nur mit geringen Widerständen und erzeugen dabei viel Wärme, die das thermische Rauschen des Detektors erhöht. Durch Reduzierung der Kontaktflächen auf die Bumps zwischen Detektor und Chip wird ein möglicher Wärmeaustausch weitestgehend unterdrückt.

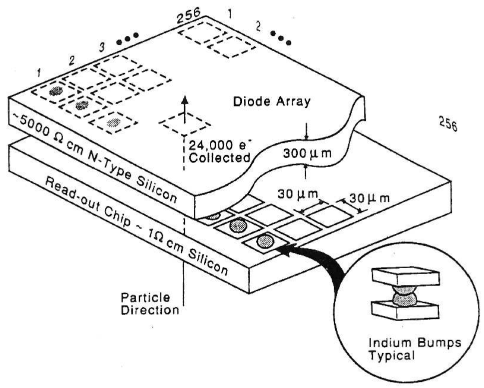

Abbildung 3.11: Darstellung von Pixeldetektoren bei denen jeder Pixel individuell mit *Bumps* verbunden ist (Quelle: Knoll, 1999, aus Haldwell 1994).

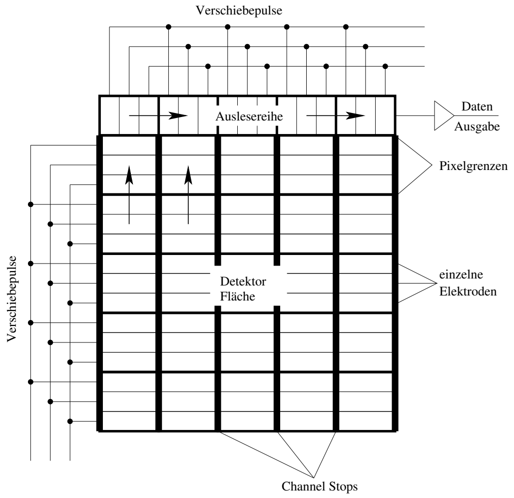

Abbildung 3.12: Schematischer Aufbau einer CCD.

3.2.2 Charged Couple Device (CCD)

CCDs wurden zuerst für die Aufnahme von optischen Bildern verwendet, bevor ihr möglicher Einsatz für Röntgenstrahlung entdeckt wurde. Da die ersten Anwendungen sehr kommerziell orientiert waren, wurde die Entwicklung von optischen CCDs sehr stark gefördert. Abbildung 3.12 zeigt eine schematische Darstellung einer CCD Struktur. Ein Pixel besteht aus drei Elektroden, die ein lokales Potentialminimum direkt unter der Oberfläche erzeugen, und ist durch *channel stops*, die in den Halbleiter implantiert sind, zwischen den jeweiligen Zeilen begrenzt. Die in der Depletationszone erzeugten Ladungsträger werden im jeweiligen Potentialminimum gesammelt und durch kontrolliertes Verschieben des Potentials mithilfe von Verschiebepulsen in Richtung Ausleseelektronik bewegt. Da das Auslesen sehr zeitintensiv ist, kann es zu *out of time events* kommen, die während des Auslesevorgangs auf den Detektor treffen und dadurch an einer falschen Stelle gemessen werden. Einige Ansätze diesen Auslesevorgang möglichst kurz zu halten sind:

- Durch Aufteilung und individuelles Verarbeiten einzelner Abschnitte einer CCD kann die Auslesezeit deutlich verkürzt werden.
- Bei der "Frame Store" Methode werden zwei Bereiche auf dem CCD unterschieden. Der Detektionsbereich wird nach einer Aufnahmezeit sehr schnell in einen vor Röntgenstrahlung geschützten Bereich, den Auslesebereich, verschoben und dort langsam ausgelesen.

Auf XMM-Newton werden für die *European Photon Imaging Camera* (EPIC) CCDs in Form der EPIC-pn und der EPIC-MOS CCD eingesetzt (Strüder et al., 2001; Turner et al., 2001; Holl et al., 1997; Holland et al., 1996).

3.2.3 Halbleiter Drift-Detektoren

In einem Drift Detektor wird durch die in Abb. 3.13 gezeigte Elektrodenkonfiguration ein Potential erzeugt, so daß die Ladungsträger zur Anode abfließen können und dort ausgelesen werden. Da die Elektronen sich entlang des Potentialgefälles im Halbleiter bewegen und sich an einer Stelle sammeln,

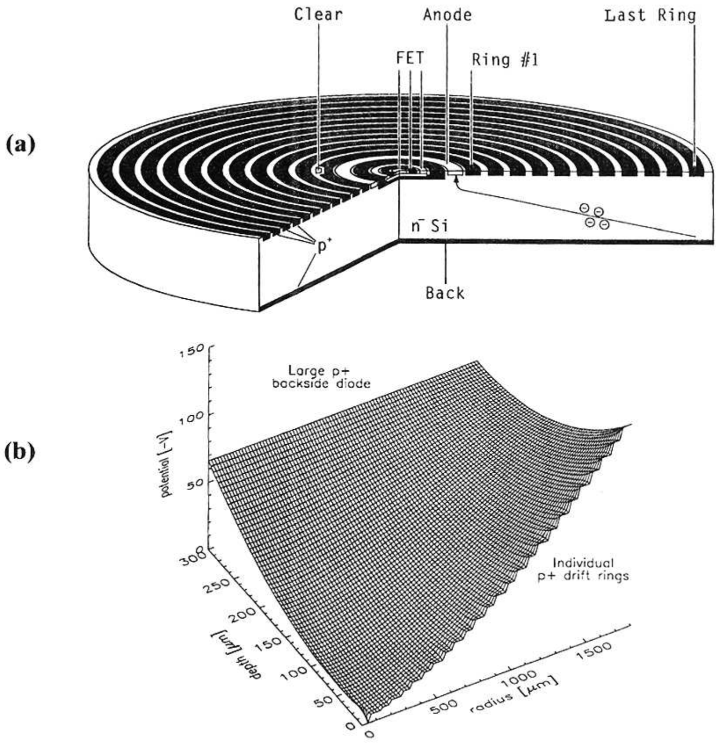

Abbildung 3.13: Aufbau eines Silizium Drift Detektors (Quelle: Knoll, 1999, aus Lechner et al. 1996).

wird nur eine kleine Anode mit einer geringen Kapazität zum Auslesen benötigt. Dadurch ist das Rauschen sehr klein und die Energieauflösung sehr gut. Durch die geringe Kapazität ist das Auslesen der Elektronen ebenfalls schnell, so daß geringere Totzeiten auftreten und somit größere Zählraten detektiert werden können. Jedoch ist die Ortsauflösung dieser Detektoren, deren Größe im allgemeinen mehr als 1 mm Durchmesser beträgt, nicht so gut, so daß sie vorzugsweise für spektroskopische Analysen und Variabilitätsuntersuchung auf sehr kurzen Zeitskalen verwendet werden. Silizium Drift Detektoren sollen bei dem *X-Ray Evolving Universerse Satellite* (XEUS), einer geplanten europäischen Satellitenmission, für die Beobachtungen sehr heller Quellen auf extrem kurzen Zeitskalen, mit einer Zeitauflösung von $\approx 10\mu$s, eingesetzt werden (Strüder et al., 2004).

3.2.4 Streifen/Strip Detektoren

Eine weitere Möglichkeit, um eine gute Ortsauflösung zu erhalten ist die Elektroden kreuzförmig anzuordnen, ähnlich einem Vieldrahtproportionalzähler, wobei sich das Halbleitermaterial zwischen Anoden und Kathoden befindet (Abbildung 3.14). Diese Elektroden, die auch als Strips bezeichnet werden, sind parallel auf der Oberfläche angebracht, wobei die Größe der einzelnen Pixel durch den Abstand der Elektroden untereinander definiert ist. Dadurch läßt sich ein zweidimensionales Bild mit einer sehr guten Ortsauflösung erzeugen. Jeder Strip kann separat ausgelesen werden, so daß sich

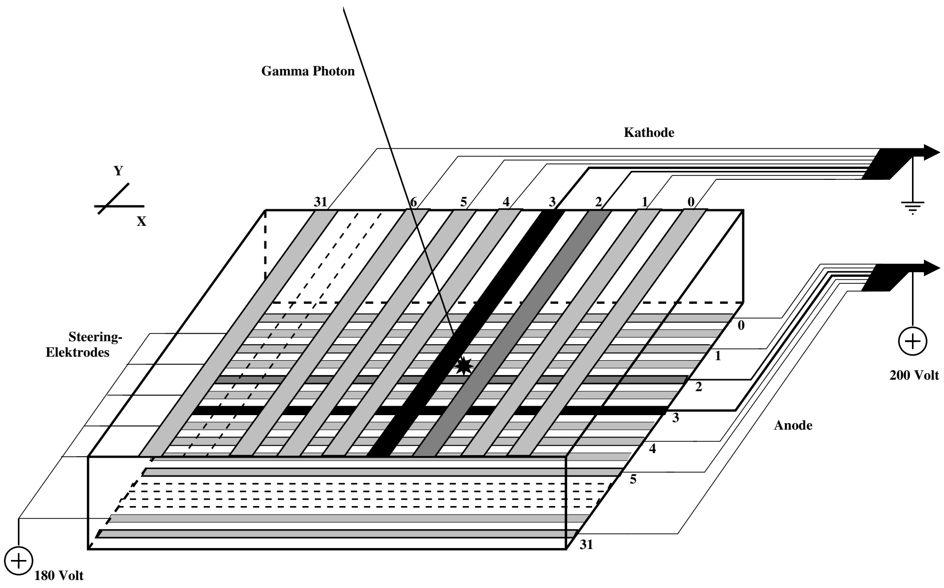

Abbildung 3.14: Aufbau eines Crossed Strip Detektors mit 32×32 Kanälen. Ein einfallendes Gamma Photon wechselwirkt mit dem Detektormaterial und wird von den Anoden und Kathoden ausgelesen (Quelle: Schanz, 2001).

dieses System durch kleine Totzeiten auszeichnet. Auch wird vergleichsweise sehr wenig Ausleseelektronik benötigt, so daß der gesamte Detektor einen sehr geringen Leistungsverbrauch hat. Für den X-Ray Monitor JEM-X auf INTEGRAL werden Mikrostrip Detektoren in einer gasgeüllten Kammer eingesetzt (Lund et al., 2003). Auch für *MIRAX* ist so eine Anordnung, jedoch ohne Gaskammer, geplant (Staubert et al., 2003).

3.3 Anwendungsgebiete

Neben der Röntgenastronomie gibt es für die beschriebenen Detektoren eine Vielzahl weiterer Anwendungsgebiete, zum Beispiel:

- optische CCDs die in kommerziellen Digitalkameras verwendet werden,
- Szintillatoren in der medizinischen Diagnostik,
- Drift-Detektoren zur Materialanalyse und Echtheitsbestimmung von Kunstschätzen,
- Szintillatoren als Nachweis für Neutronen.

Kapitel 4

Event Pre-Prozessor

Da die Datenrate des Hard X-Ray Imager auf *MIRAX* sehr groß ist, wird ein Event Pre-Prozessor (EPP) zur Datenreduktion benötigt, um mit der vorhandenen Telemetrie alle Ereignisse an die Bodenstation zu übermitteln. Dazu wird ein strahlungsresistenter *Field Programmable Gate Array* (FPGA) Baustein, in dem das Datenverarbeitungsprogramm fest integriert ist, verwendet. Für die Programmierung des FPGA wird die *Very High Speed Integrated Circuit **H**ardware **D**escription **L**anguage* (VHDL) Programmiersprache eingesetzt, die es ermöglicht, digitale Operationen als Programm zu entwickeln und diese dann einfach in den FPGA Baustein zu übertragen. Das EPP Design wurde von Thomas Schanz am IAAT entwickelt (Schanz, 2001) und erste funktionale Tests sind bereits durchgeführt worden. Der EPP war ursprünglich für den Gamma-Ray Burst Monitor auf dem Satelliten GLAST vorgesehen, der nun jedoch ohne Tübinger Beteiligung entwickelt wird. Da für die *MIRAX* Mission ein ähnlicher *High X-Ray Imager* (HXI) wie bei GLAST vorgesehen ist, bietet es sich an, das bereits vorhandene EPP Design zu übernehmen. Der Grund für den Einsatz eines FPGAs lag damals in der grossen Anzahl an Rechenoperationen, die durchgeführt werden müssen. Damalige Prozessoren waren nicht in der Lage, diese Operationen mit einer ausreichenden Geschwindigkeit vorzunehmen. Seit kurzem gibt es strahlungsresistente Prozessoren, die so hohe Geschwindigkeiten erreichen, weswegen überlegt wird, das vorhandene EPP Design als Computerprogramm zu übernehmen und diese Prozessoren anstatt der FPGAs für die Datenreduktion einzusetzten. Diese Arbeit beruht jedoch noch auf dem Plan, die Datenreduktion mit einem FPGA Baustein durchzuführen. In diesem Kapitel sollen die einzelnen Aufgaben des EPP (Suchy et al., 2004) und die teilweise von mir entwickelte Testumgebung vorgestellt werden.

4.1 Warum ein EPP

4.1.1 Abschätzung der erwarteten Datenmenge

Die Rohdatenmenge, die von den Detektoren erwartet wird, übertrifft die Kapazität der Telemetrieverbindung vom Satelliten zur Bodenstation während des zehnminütigen Kontakts pro Orbit. Die gemessenen Daten einer Elektrode des HXIs enthalten 40 Bit (= 5 Byte) an Information, die sich aus Zeit, Ort, Energie und drei *Valid Data Bits* (VD Bits) zusammensetzt (Abbildung 4.1). Dieses Datenpaket wird als Hit bezeichnet. Da die Information von mindestens 2 Elektroden, einer Anode und einer Kathode benötigt werden, um eine zweidimensionale Ortsbestimmung durchzuführen, muß ein eintreffendes Photon, das sogenannte *Event*, mit mindestens zwei Hits detektiert werden. Verteilt sich die Ladungswolke auf mehrere, nebeneinanderliegende Elektroden, werden alle Kanäle, die eine ein-

Abbildung 4.1: Aufbau eines gemessenen Hits mit einer Länge von 40 Bits, wie er von den RENA Boards erzeugt wird. Die *Valid Data Bits* zeigen an ob es zu einer Unterbrechung im Datenfluß (*Truncated* = TR) gekommen ist, der Zwischenspeicher voll (*Full FIFO* = FF) ist oder ob das Ereignis ein internes Reset Signal (*Forced Reset* = FR) war.

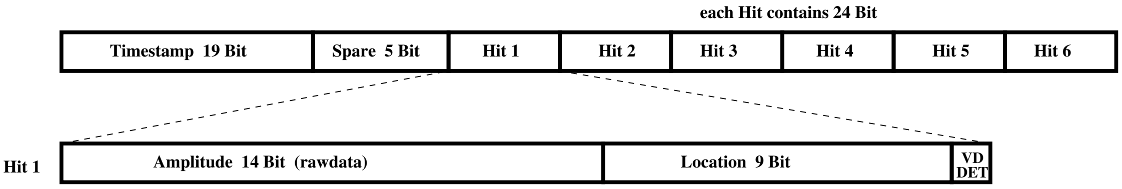

Abbildung 4.2: Aufbau eines *Event Paketes*, welches aus 6 einzelnen Hits mit gleicher Aufnahmezeit zusammengesetzt wurde. Die Gesamtlänge beträgt nur noch 168 Bit. Der Ort wurde auf eine Länge von 9 Bits verkleinert, da das allgemeine System für mehr RENA Boards als verwendet ausgelegt ist.

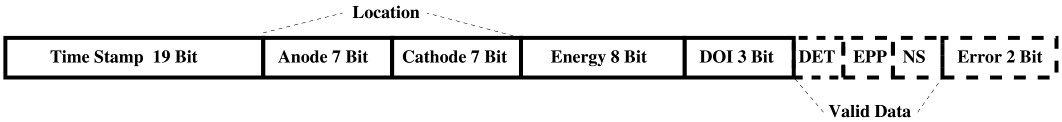

Abbildung 4.3: Ausgabe eines *Event Paketes* nach Verarbeitung mit dem EPP. Die endgültige Länge beträgt 44 Bit plus mögliche 5 weitere Bits, die zu Analysezwecken mitgeführt werden können.

stellbare Schwellspannung überschreiten, ebenfalls ausgelesen. So ein Ereignis wird als *Split Event* bezeichnet. Somit kann sich die Datenmenge für ein einfallendes Photon auf bis zu 30 Bytes, drei nebeneinander liegende Elektroden in X- und Y-Richtung, erhöhen. Mit einer erwarteten Zählrate aus der Galaktischen Ebene, für einen einzelnen *High X-Ray Imager* (HXI), von $\approx 320\,\mathrm{cts}/\mathrm{s}$, ergibt sich eine Datenmenge von

$$30\,\frac{\text{Bytes}}{\text{count}} \cdot 320\frac{\text{counts}}{\text{sek.}} = 9.6\,\frac{\text{kbytes}}{\text{sek.}}.$$

Mit einer möglichen Beobachtungszeit von 60 min pro Orbit ergibt das eine gesamte Datenmenge von $\approx 35\,\mathrm{MByte}/\mathrm{HXI}$. Da bei *MIRAX* zwei HXIs eingesetzt werden sollen, ergibt sich eine doppelt so große Datenmenge. Ebenfalls müssen die Daten vom *Soft X-Ray Imager* (SXI), die eine Größe von $\approx 16\,\mathrm{MByte}/60\,\mathrm{min}$ haben, sowie *Housekeeping* und *Telemetrie Overhead*, also Daten die für die Steuerung und überwachung der Instrumente und des Satelliten notwendig sind, mit einbezogen werden. Dies ergibt eine Datenmenge von $> 90\,\mathrm{Mbyte}$, die innerhalb einer zehnminütigen Verbindung an die Bodenstation übertragen werden soll. Dies ist nicht möglich, da nur eine Verbindung mit $\approx 400\,\mathrm{kbit/sec}$, mit der eine Datenübertragung von $\approx 30\,\mathrm{MByte}/Orbit$ erreicht wird, zur Verfügung steht. Aus diesem Grund ist eine On-Board Datenreduktion notwendig.

4.1.2 Einzelne Aufgaben des EPPs

Der EPP führt eine Datenreduktion der HXIs durch, indem die vier folgenden Arbeitsschritte ausgeführt werden:

1. Zusammengehörige Hits zu einem *Event Paket* (Abbildung: 4.2) zusammenfassen,
2. Energiekorrektur der einzelnen Hits durchführen,
3. Ortsbestimmung des eintreffenden Photons,
4. Filtern von ungültigen und fehlerhaften Events.

Dies ermöglicht eine Reduzierung der Daten, wobei der Informationsverlust nicht sehr signifikant ist. Auf die einzelnen Punkte wird in den folgenden Abschnitten noch einmal genauer eingegangen.

Daten zusammenfassen

Nachdem ein Ereignis detektiert und die entsprechenden Kanäle ausgelesen worden sind, findet eine Sortierung der Hits nach Auslesezeiten, den sogenannten Timestamps, statt. Die drei VD-Bits werden zu einem einzelnen VD-Detektor Bit zusammengefasst, welches angibt, ob das Auslesen der Daten aus dem Detektor vollständig durchgeführt wurde oder eine Unterbrechung des Datenstroms bzw. ein Speicherüberlauf stattgefunden hat. Diese Hits werden dann an das Control Interface (CTI) weitergeleitet, wo sie zu einem *Event Paket* zusammengefasst werden. Im ersten Schritt wird festgestellt, welche Elektroden angesprochen wurden und ob das gemessene Ereignis ein *Split Event* ist. Dazu werden die Kanalnummern und die Nummer des Auslesechips ermittelt und um die entsprechende *Board ID*, d.h. die Nummer des ausgelesenen RENA Boards, ergänzt. Auf die RENA Boards wird in Kapitel 5.1.2 nochmals genauer eingegangen. Liegen maximal drei Anoden und maximal drei Kathoden direkt nebeneinander, so werden diese Hits zu einem *Event Paket* zusammengefasst. Finden sich Lücken in den ausgelesenen Elektroden, oder wurden nur Anoden bzw. Kathoden detektiert, so ist dieses Ereignis ungültig und wird verworfen. Da der EPP eine feste Eingabelänge von 168 Bits benötigt, welche sich aus einem Timestamp und sechs einzelnen Hits zusammensetzt (Abbildung 4.2), müssen gegebenenfalls *Zero-Hits*, d.h. Hits die nur aus Nullen bestehen und keinen Einfluß auf die Datenreduktion haben, eingesetzt werden.

Energiekorrektur

Eine Energiekorrektur muß durchgeführt werden, da die Energiewerte der gemessenen Elektroden addiert und die Wechselwirkungstiefe des Ereignisses bestimmt wird. Wenn keine Korrektur durchgeführt wird, so ergeben sich unterschiedliche Werte bei der gemessenen Energie, je nachdem an welchen Elektroden ein Ereignis detektiert wird. Dabei müssen zwei Effekte berücksichtigt werden, die einen Einfluß auf die Meßergebnisse haben. Da bei einem Crossed Strip Detektor jeder Kanal separat ausgelesen wird, kommt es zu einer unterschiedlichen Verstärkung durch die verwendeten Feldeffekt-Transistoren (FET), die hier als Operationsverstärker dienen. Idealerweise sollte die Verstärkung linear erfolgen, jedoch ergeben sich durch kleine Produktionsunterschiede unterschiedliche Verstärkungsfaktor für die einzelnen Kanäle, abhängig von der gemessenen Energie. Mithilfe des Polynoms

$$E_{\text{out}} = A + BE_{\text{in}} + CE_{\text{in}}^2$$

lässt sich der endgültige Fehler auf weniger als 5 % Abweichung vom idealen Wert korrigieren. Die Zahlenwerte für A, B und C müssen dabei für jede einzelne Elektrode separat bestimmt werden. Diese Werte werden in einer sogenannten *Look Up Table* (LUT) abgespeichert und müssen bei jeder neuen Inbetriebnahme jedesmal in den FPGA Chip geladen werden.

Ein anderer Effekt wird durch die Rekombination der Ladungsträger hervorgerufen (Kalemci & Matteson, 2000). Durch Ermittlung der Wechselwirkungstiefe (*Depth of Interaction* = DOI), die aus dem Verhältnis der Anoden- und Kathodenamplitude berechnet wird, kann eine Korrektur für die Rekombination erfolgen. Zur Zeit wird diese Korrektur noch nicht durchgeführt, da noch keine Pläne existieren, ob sie auf dem Satelliten oder in der Nachbereitung am Boden durchgeführt werden soll. Deswegen wird diese Korrektur zur Zeit durch eine Multiplikation mit 1 überbrückt. Für die *On-Board* Korrektur könnte ebenfalls ein *Look-Up-Table* (LUT) verwendet werden, die definierte Korrekturwerten für bestimmte Eindringtiefen enthält.

Ortsbestimmung

Nach der Energiekorrektur kann eine Ortsbestimmung des *Event Paketes* durchgeführt werden. Dafür wird der maximale Energiewert der drei Anoden und Kathoden bestimmt. Die Elektrode mit dem größten Energiewert entspricht der Auftreffposition des Photons. Dadurch ergibt sich eine Ortsauflösung von 0.5 mm, die dem Abstand der einzelnen Elektroden entspricht.

Abschliessend wird noch ein weiteres VD-Bit (VD-EPP) hinzugefügt, um anzugeben, ob es bei der Energiekorrektur oder der Ortsbestimmung zu Fehlern gekommen ist, wie z.B. Division durch Null oder Zahlenwerte die zu groß für den vorgesehen Speicherplatz sind.

Filter

Nachdem die Energiekorrekturen und Ortsbestimmungen durchgeführt sind, kann ermittelt werden, ob das *Event Paket* einen gültigen Energiewert besitzt, sich also im Meßbereich des Detektors befindet. Zu diesem Zweck werden obere und untere Grenzwerte definiert, die ebenfalls in einer eigenen LUT gespeichert sind, mit denen der summierte Energiewert verglichen wird. In diesem Schritt wird ein weiteres VD-Bit (VD-Noise) hinzugefügt, welches angibt, ob sich der gemessene Energiewert innerhalb oder außerhalb der gegebenen Grenzwerte befindet.

Die letzte Stufe ist durch das Veto Detektor Modul gegeben, bei dem die drei erzeugten VD-Bits auf ihre Gültigkeit überprüft werden und gegebenenfalls das gesamte *Event Paket* verworfen wird. Die gültigen Daten, die dann auch an die Bodenstation geschickt werden, haben noch eine Größe von 44 Bit und enthalten neben dem Timestamp, dem Ort und der Energie, auch noch ein 3 Bit DOI (Abbildung: 4.3). In einem geplanten Analysemodus können die drei VD-Bits, im Bild gestrichelt dargestellt, ebenfalls gespeichert und zur Bodenstation gesendet werden. Dies erlaubt eine nachträgliche Fehleranalyse, falls es zu Problemen bei der Messung oder der Datenreduktion kommt.

Durch diese Datenreduktion ist das *Event Paket* auf eine Größe von 44 Bit/Event reduziert worden. Dies entspricht einem Faktor von ≈ 7 bzw. einer Datenmenge von ≈ 16 MByte für die HXIs.

4.2 Aktuelles EPP Design

Das aktuelle EPP Design ist modular aufgebaut, so daß Veränderungen in der Struktur oder zusätzliche Module einfach eingefügt werden können. Die wichtigsten Bestandteile des EPP sind bereits implementiert und auf ihre Funktionalität getestet. Abbildung 4.4 zeigt eine schematische Darstellung des EPP Designs, wobei die grau markierten Bereiche die bereits getesteten Einheiten darstellen. Das DOI ist, wie bereits erwähnt, noch nicht entwickelt, jedoch ist das entsprechende Modul zur Bestimmung der Wechselwirkungstiefe bereits im Design enthalten. Das *Control Interface* sowie die Kommunikation zwischen RENA Chips, Detektor und EPP sind ebenfalls noch nicht entwickelt. Die bisherigen

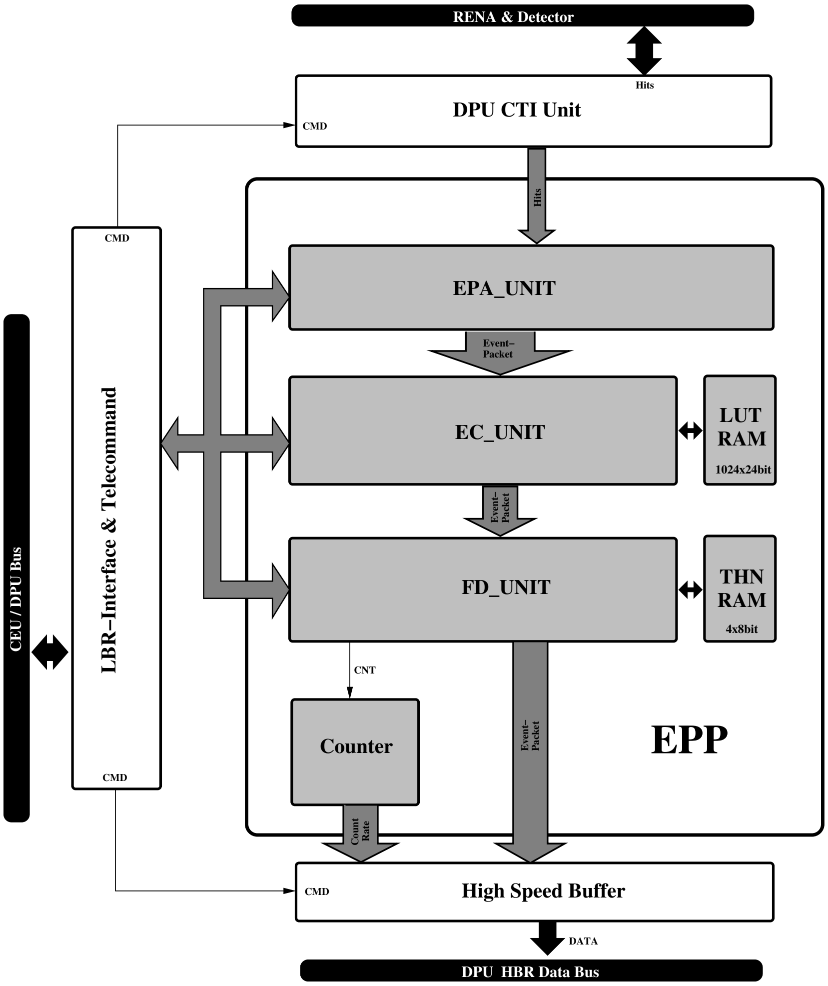

Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Datenstroms im EPP.

Tests wurden mit selbst erzeugten Daten durchgeführt, um die Funktionalität der einzelnen Module zu überprüfen und das Verhalten bei fehlerhaften Datenpaketen festzustellen. Da die Verbindung zwischen dem EPP Design und dem Datencomputer bisher nur über einen *Peripheral Component Interconnect Bus* (PCI-Bus) möglich ist, konnten keine Zeit- und *Pipeline*-Untersuchungen durchgeführt werden. Beim *Pipeline* Betrieb ist die Datenreduktion in mehrere Schritte unterteilt. Dadurch ist es möglich, die Reduktion an einem Datenpaket zu starten, bevor das vorhergehende Paket vollständig verarbeitet wurde. Dies führt zu einer deutlichen Beschleunigung der Datenreduktion, die besonders bei hohen Zählraten, z.B. von X-Ray Bursts, erwartet werden. Dadurch lassen sich die benötigten Speicher, für die Zwischensicherung der Messwerte bei der Verarbeitung, reduzieren.

4.3 Testbench

Für den EPP wurden zwei unabhängige Testumgebungen (*Testbenches*) entwickelt, auf die in diesem Abschnitt genauer eingegangen werden soll. Jede Testbench kann die einzelnen Module separat oder auch den gesamten EPP Entwurf testen. Somit lassen sich schon während der Entwicklung der

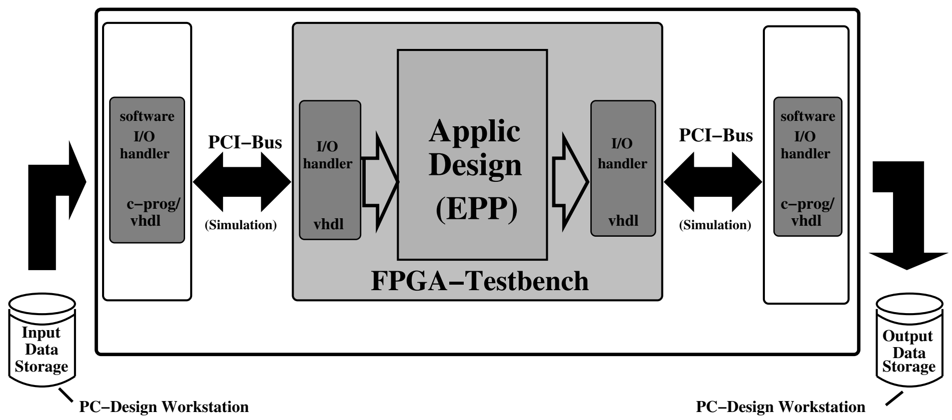

Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Testbenchumgebung des EPPs. Hardware und Software Testbench unterscheiden sich dabei in der Form der Software I/O Handler (Quelle: Suchy et al., 2004).

einzelnen Module[1], Fehler bei der Datenverarbeitung finden und korrigieren. Um das geschriebene Programm auf einem FPGA Chip einsetzen zu können, muß nach dem Design Entwurf eine Synthese des Programms durchgeführt werden. Die Synthese übersetzt den VHDL-Code in eine für den FPGA Chip lesbare Datei, die die Funktionen des Programms auf die im Chip enthaltenen logischen Gatter überträgt. Da dies sehr viel Zeit kostet, wurde eine Software Testbench entwickelt, die die Funktionalität eines Moduls bereits vor der Synthese verifiziert. Um festzustellen ob die Synthese erfolgreich verlaufen ist, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Hardware-Testbench entwickelt, mit deren Hilfe das synthetisierte EPP Design auf einem FPGA Chip überprüft werden kann.

Da jedes einzelne Modul eine unterschiedliche Anforderung an die Ein- und Ausgabe stellt, können die Testbench Programme individuell an die einzelnen Modulen angepasst werden. Die Verzeichnisstruktur für ein Modul unterteilt sich in einen VHDL-, einen C- und einen Simulations- (SIM) Verzeichnis. Im VHDL-Verzeichnis befinden sich die Dateien, die die Funktionen des Moduls in der VHDL Sprache beschreiben. Auch ist dort die Datei abgespeichert, die bei der Synthese des VHDL-Codes erzeugt wird. Im C-Bereich befinden sich die Quellcodes und die compilierten Dateien der C++-Programme. Beide Bereiche enthalten ebenso ein eigenes SIM Verzeichnis, in welchem die Ergebnisse der jeweiligen Testbench gespeichert werden. Im SIM-Bereich befinden sich die Testdaten sowie die notwendigen LUTs, die für die Eingabe bei dem jeweiligen Modul verwendet werden sollen. Beide Testbenches greifen dabei auf die gleichen Datensätze zu, um sicherzustellen, daß jeweils die selben Daten für die Eingabe benutzt werden.

Software Testbench

Die Software-Testbench verwendet das Programm *ModelSIM 5.5e* von *Model Technology*, um die Überprüfung des Modul Designs durchzuführen. Da beim Compilieren des VHDL-Programms jeweils nur eine einzige Binärdatei entsteht, die dann von der *ModelSIM* Software getestet wird, muß neben der eigentlichen Aufgabe des Moduls auch eine VHDL Ein- und Ausgabe-Verarbeitung, ein sogenannter *I/O Handler*, sowie ein Software *I/O Handler* in die Programmstruktur eingebunden werden (Abbildung 4.5).

[1] Im weiteren Verlauf steht, falls nicht anders angegeben, ein Modul auch für das gesamte EPP Design

Abbildung 4.6: Der geöffnete Testcomputer, in dem die SPYDER Entwicklungskarte eingebaut ist. Die Karte ist an einen Logic-Analyser angeschlossen, mit dem der Datenstrom überwacht werden kann.

Die Aufgabe des Software *I/O Handler* besteht darin, die Zugriffe auf ein Speichermedium zu ermöglichen und die Testdaten an den I/O Handler weiterzuleiten. Die Testdaten werden dabei in 32 Bit Stücke unterteilt, um den PCI-Bus zu simulieren, der bei der Hardware Testbench verwendet wird.

Der VHDL I/O Handler umschließt das eigentliche Modul-Design und ist eine Schnittstelle, die aus den empfangenen Daten ein Datenformat erstellt, welches im eigentlichen Design für das jeweilige Modul vorgesehen ist. Beispielsweise verwendet das *Sum of Anodes* Modul (SOA), das Modul in dem die Summe der Anoden gebildet wird, nur die drei Energiewerte der Anoden um seine Aufgabe zu erfüllen. Im endgültigen EPP Design werden diese drei Energiewerte vom vorhergehenden Energiekorrekturmodul bereitgestellt. Wenn aber nur ein einzelnes Modul getestet wird, so müssen die entsprechenden Schnittstellen zu den anderen Komponenten ebenfalls simuliert werden.

Hardware Testbench

Nachdem die Software Testbench die fehlerfreie Funktion des EPP Moduls bestätigt hat, erfolgt die Synthese für den entsprechenden FPGA Chip, mithilfe der *Leonardo LS2001* und der *XILINX ISE* Software. Während die *Leonardo* Software die Synthese durchführt, integriert die *XILINX* Software das VHDL Programm in die logischen Gatter des FPGA Chips. Um sicherzustellen daß die Synthese

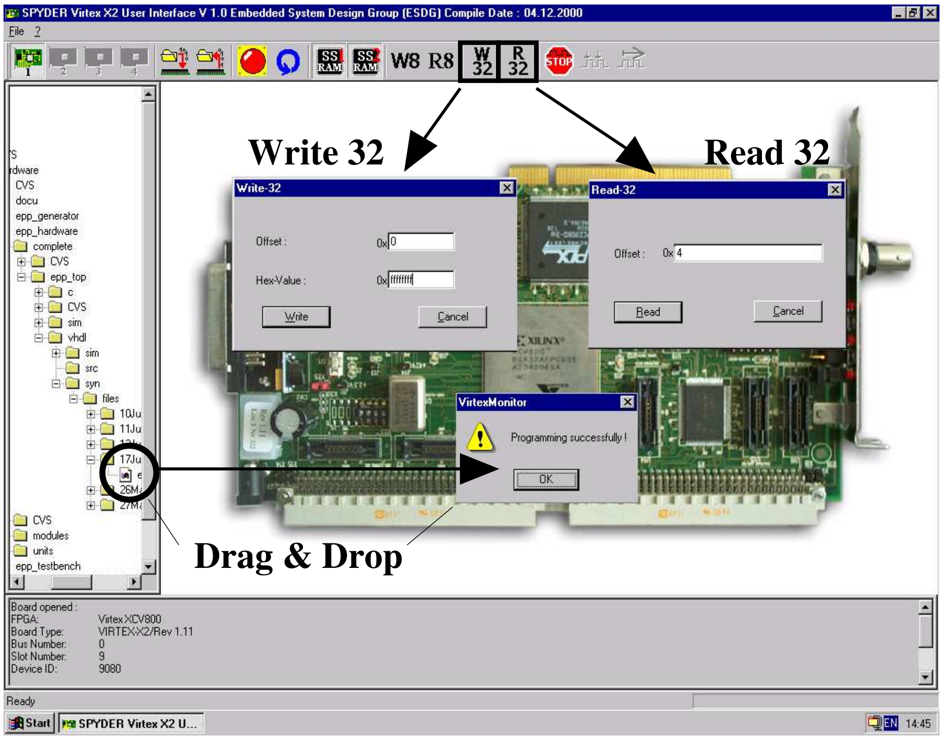

Abbildung 4.7: Mit der *Virtex Monitor* Software können VHDL Programme in den FPGA geladen werden. Ebenso lassen sich manuell Datenpakete eingeben und Ergebnisse ablesen.

erfolgreich verlaufen ist, wurde eine zweite Testbench entwickelt, die die fehlerfreie Funktion der synthetisierten Datei bestätigt.

Zu diesem Zweck wurde eine *FPGA* Entwicklungskarte von der Firma X2E verwendet, die sich in einem Testcomputer befindet (Abbildung 4.6). Diese Karte enthält einen FPGA Chip auf den ein synthetisiertes VHDL Design geladen werden kann. Der Chip besitzt ≈ 800000 logische Gatter und arbeitet mit einer Taktfrequenz von bis zu 40 MHz. Der Speicher für die LUTs wird als interner RAM direkt vom FPGA Chip zur Verfügung gestellt und beträgt ≈ 130 kbit. Die Aufgabe des Host Computers besteht darin, die benötigte Betriebsspannung bereitzustellen und über den PCI-Bus eine Verbindung zu einem Speichermedium zu ermöglichen. Da das Daten I/O vollständig über den PCI-Bus erfolgt, ist auch hier kein *Pipeline* Betrieb möglich.

In einem zukünftigen Aufbau soll die Entwicklungskarte ohne Computer betrieben werden, um einen unabhängigen Betrieb zu simulieren. Das entsprechene VHDL Programm kann dabei über ein spezielles *Download Kabel* mit einer *Joint Test Action Group*- (JTAG) Programmierschnittstelle direkt auf den FPGA Chip geladen werden. Die Stromversorgung und die I/O Anschlüsse zum Detektor und zu einem externen Speicher erfolgen dabei direkt an der Entwicklungskarte. Dieser Aufbau erlaubt dann einen *Pipeline*-Betrieb, da der I/O über unterschiedliche Wege stattfindet, und somit keine Konflikte bei der Datenübertragung entstehen können.

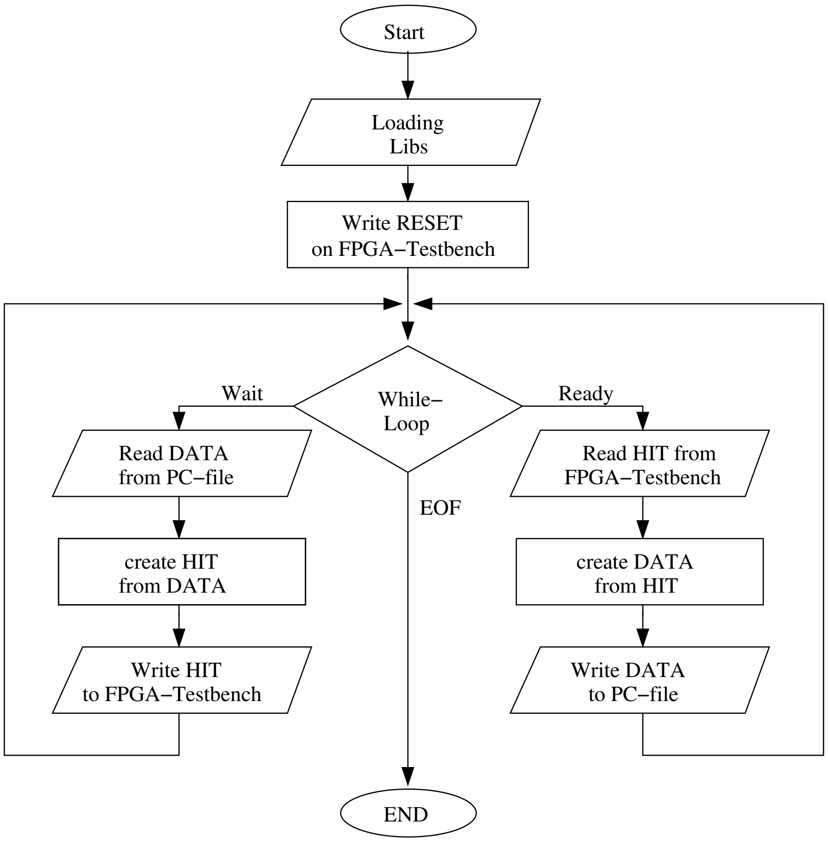

Abbildung 4.8: Flußdiagramm der C++ I/O Software während des Betriebs eines *WORK* Programmes.

Verwendete Software

Das Laden des VHDL Design in den FPGA erfolgt mit der mitgelieferten *Virtex Monitor* Software[2] (Abbildung 4.7). *Virtex* ist der Namen der Produktfamilie, zu der der hier eingesetzte FPGA Chip gehört. Nach der VHDL Synthese kann die dabei erzeugte Binärdatei durch *Drag & Drop* auf die Kartenabbildung geladen werden. Wenn das Laden des Programms erfolgreich war, erscheint ein Bestätigungfenster. Somit ist das VDHL Programm betriebsbereit und kann über eine manuelle Eingabe oder ein geschriebenes I/O Programm angesprochen werden.

Die Monitor-Software ermöglicht ein manuelles Eingeben von Bitmustern. Mit der **Write**-Option des Programmenüs lassen sich durch Eingabe einer Adresse, hier als Offset angegeben, und einem maximal achtstelligen Hexadezimalwert bis zu 32 Bit an den FPGA übertragen. Der Wert, der an einer einzelnen Adresse liegt, kann mit der **Read**-Option ausgelesen werden. Dies ist vor allem Hilfreich, um den Zustand des Programms nach einem Fehler in der Datenverarbeiung zu ermitteln.

Da die manuelle Eingabe der einzelnen Datenpakete in Hexadezimalform sehr umständlich ist, besteht die Möglichkeit, die Entwicklungskarte mithilfe von C++ Programmen anzusprechen. Das von mir entwickelte Programm benutzt bereits vorhandene Programmkommandos, um über den

[2]Diese Software kann auch unter www.x2e.de heruntergeladen werden.

32 Bit PCI-Bus Testdaten an den FPGA zu schicken und Ergebnisse vom FPGA zu lesen. Nach jedem Laden eines synthetisierten VHDL Programmes muß die SPYDER Karte im Programm initialisiert werden. Diese Initialisierung und das Senden eines *Reset* Signals wird in jedem der geschriebenen Testprogramme, auf die weiter unten noch näher eingegangen wird, durchgeführt. Die VHDL I/O Software ist so programmiert, daß sie nach einem empfangenen *Reset* Signal in einen *Wait*-Zustand übergeht und auf die Eingabe von entsprechenden Daten wartet.

Es existieren drei unterschiedliche Gruppen von C++ Programmen, die alle über eine Kommandozeile im Betriebssystem aufgerufen werden können. Dabei wird zwischen *LUT Upload*, *LUT Download* und dem *WORK* Programm unterschieden. Während die *LUT Upload* und *LUT Download* Programme jeweils nur einen Datentransfer in eine einzige Richtung, zum bzw. vom FPGA, durchführen, muß das WORK Programm sowohl Daten senden als auch empfangen können. Um festzustellen, ob Daten hoch- oder herunterladen werden sollen, nimmt der EPP definierte Zustände ein, die anzeigen welche Operation ausgeführt werden soll. Das C++ Programm fragt kontinuierlich den Zustand des EPPs ab und führt die entsprechende Funktion aus. Abbildung 4.8 zeigt ein Flußdiagramm eines *WORK* Programmes, wobei der *Wait* Zustand anzeigt, daß der FPGA auf Daten wartet und der *Ready* Zustand angibt, daß die Ergebnisse der Datenverarbeitung ausgelesen werden können.

Um einen detaillierten Überblick über die gesamte Testumgebung und den aktuellen Stand des Event Pre-Prozessors und dem Testbenchprojekt zu bekommen, verweise ich hier auf den *MIRAX HXI EPP Testbench Report* und auf den *EPP Design Report*, der am IAAT im Umlauf ist.

Kapitel 5

Der CZT Aufbau am IAAT

5.1 Der Aufbau am Institut

Um den Event Pre-Prozessor unter Echtzeitbedingungen testen zu können, wurde entschieden einen Röntgenmeßstand aufzubauen, an dem die FPGA Entwicklungskarte direkt angeschlossen werden kann. Ziel dieser Diplomarbeit war es, diesen Röntgenmeßstand in Betrieb zu nehmen und eine Charakterisierung des Detektors durchzuführen. In diesem Kapitel wird der derzeitige Aufbau am IAAT und die Funktionsweise vorgestellt.

5.1.1 CZT Detektor

Der Detektor besteht aus einem Cadmium Zink Tellur (CZT) Halbleiter mit einer Crossed Strip Elektrodenanordnung, auf die bereits in Kapitel 3.1.5 und 3.2.4 eingegangen wurde. Der Vorteil dieses Materials ist die gute Energieauflösung bei Raumtemperatur von $< 2\,\%(\approx 1\,\mathrm{keV})$ bei 60 keV, so daß keine zusätzliche Kühlvorrichtung benötigt wird. Der Detektor besteht aus einem CZT Kristall mit einer Größe von $25\,\mathrm{mm} \times 25\,\mathrm{mm}$ und einer Dicke von 2 mm. Die Anoden bestehen aus 50 parallel angeordneten Elektroden, an die eine Spannung zwischen 150 V und 275 V angelegt wird. Die Anoden sind an der Vorderseite des Detektors angebracht. Auf der Rückseite sind 50 parallele Kathoden, die mit der Masse verbunden sind, senkrecht zu den Anoden angebracht und bilden mit diesen eine kreuzförmige Anordnung (*Crossed Strip*). Die Gitterkonstante der einzelnen Elektroden beträgt 0.5 mm, wobei Anoden und Kathoden ein unterschiedliches Design besitzen. Während die Kathoden jeweils eine Breite von 450μm und einen Abstand von 50μm zueinander haben, sind die Anoden jeweils nur 100μm breit, wobei sich zwischen den Anoden noch Steuerelektroden, sogenannte *Steering Elektroden* (SE), befinden, die ebenfalls eine Breite von 100μm besitzen. Dadurch ergibt sich ein Abstand von 150μm zwischen Anoden und SEs (Abbildung 5.1). An den SEs ist eine Spannung von $\approx 0.9 \cdot V_{\mathrm{Anoden}}$ angelegt, die mithilfe eines Spannungsteilers direkt aus der Anodenspannung erzeugt wird. Die Spannung ist mithilfe eines integrierten Potentiometer variierbar. Die SEs dienen zur Verbesserung der Anodensignale, indem der sogenannte *Small Pixel Effect*, der im folgenden Abschnitt noch genauer erklärt wird, zum tragen kommt. Der Detektor ist auf einem *Splayed Out Board* angebracht, welches die einzelnen Elektrodenkontakte auffächert, um eine bessere Anschlussmöglichkeit für die einzelnen Kabel zu erhalten. Abbildung 5.2 zeigt ein Foto des Detektor mit dem *Splayed Out Board*. Die einzelnen Elektroden sind über sehr hohe Widerstände ($\approx 1\,\mathrm{G}\Omega$) mit dem RENA Chip verbunden, damit aus den erzeugten kleinen Strömen meßbare Spannungen entstehen. Die Elektroden sind individuell auf die Eingänge eines RENA Chips verschaltet, und können separat ausgelesen werden.

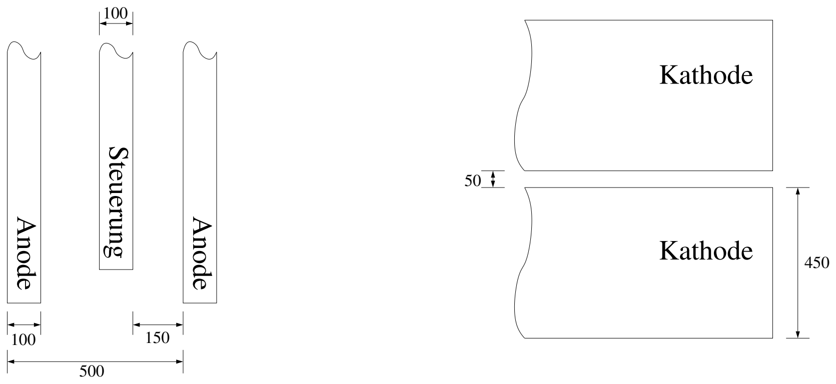

Abbildung 5.1: Darstellung der Größenverhältnisse der Anoden und Kathoden. Alle Größenangaben sind in μm angegeben. Zwischen den Anoden befinden sich Steuerungselektroden.

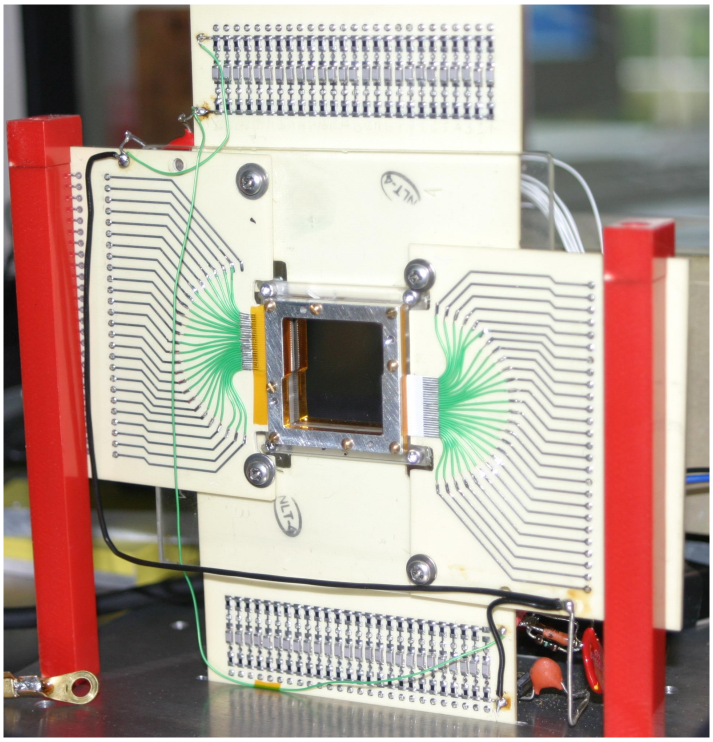

Abbildung 5.2: Vorderansicht des CZT Crossed Strip Detektores, der auf einem *Splayed Out Board* angebracht ist.

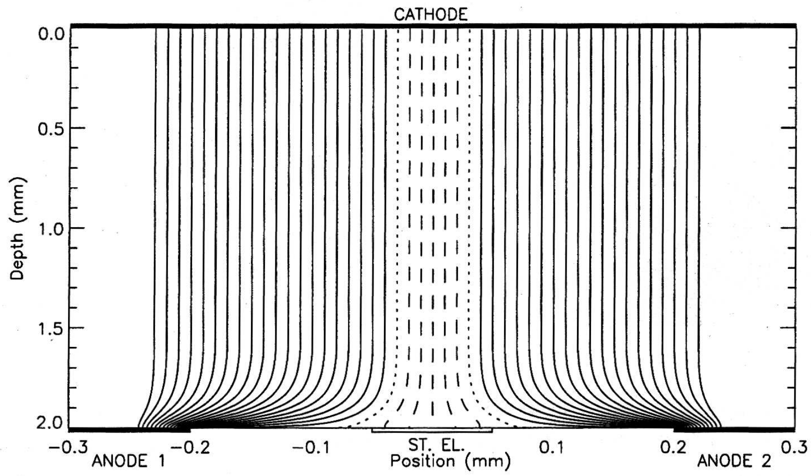

Abbildung 5.3: Feldverlauf der Anoden mit Steering Elektroden. Deutlich ist die Veränderung des Potentials durch die Steering Elektroden zu sehen. Die Elektronen driften entlang der Feldlinien auf die Anoden (Kalemci & Matteson, 2000).

Small Pixel Effect

Die bei einem Halbleiterdetektor erzeugten Elektron-Loch Paare werden durch die angelegte Spannung getrennt und die Ladungsträger zu den jeweiligen Elektroden transportiert. Dabei besitzen Elektronen und Löcher eine unterschiedliche Mobilität, welche angibt wie groß die freie Weglänge und somit die Lebensdauer eines Ladungsträgers ist, bevor eine Rekombination eintritt. Durch Verkleinerung der Elektroden wird die Potentialänderung zu den Elektroden sehr groß, und die einzelnen Ladungsträger werden stärker an die Elektroden beschleunigt. Ist nun das Verhältnis von Elektrodengrösse zu Detektordicke klein, so wirkt nur der sehr steile Anteil des Potentials. Die Driftzeit der Ladungsträger im Halbleitermaterial wird geringer, wodurch sich eine kleinere Rekombinationsrate ergibt und die Verluste geringer werden (Barrett, Eskin & Barber, 1995).

Steering Elektrodes

Zwischen den einzelnen Anoden sind Steuerungselektroden, sogenannte *Steering Elektrodes*, angebracht, an denen eine Spannung von $\approx 0.9 \cdot V_{\mathrm{Anoden}}$ angelegt ist. Es wird versuch die Anoden möglichst klein zu machen, um den bereits erwähnten *Small Pixel Effect* auszunutzen. Da aber durch kleine Anoden die mögliche Sammelfläche geringer wird, entstehen sehr große Lücken im möglichen Detektionsbereich des Halbleiters. Fällt ein Photon in eine dieser Lücken, ist das dort wirkende Potential so klein, daß die erzeugten Ladungsträger fast vollständig rekombinieren bevor sie detektiert werden. Durch die *Steering Elektroden* kann das gesamte Potential so angepasst werden, daß die Bereiche, in denen keine Detektion möglich ist, sehr klein werden.

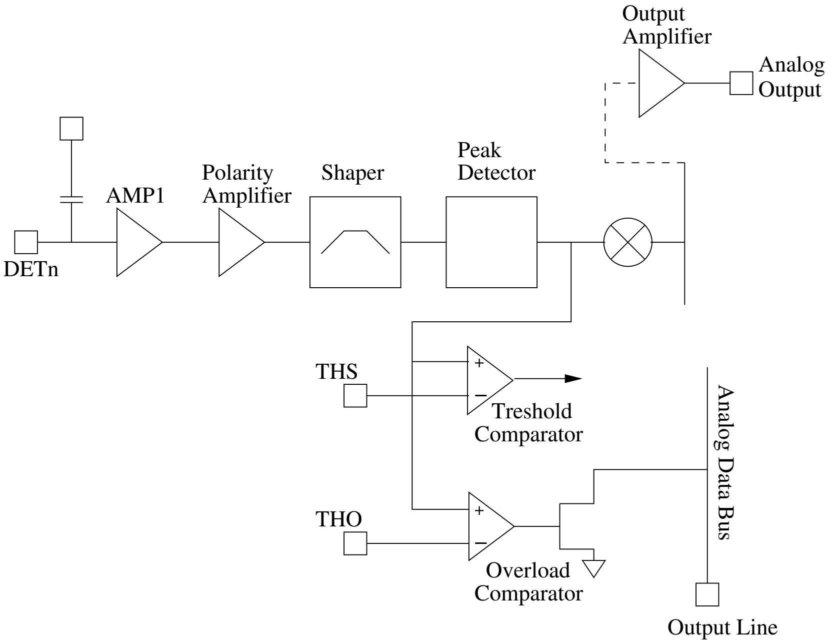

Abbildung 5.4: Schematischer Layout des RENA Boards

5.1.2 RENA Board

Vom Detektor aufgenommene Ereignisse werden im kommerziell erhältlichen *Readout Electronics for Nuclear Application* (RENA) Chip ausgelesen, der von der Firma NOVA R&D entwickelt wurde (Kravis et al., 1998; Maeding et al., 1998). Jeder RENA Chip kann 32 separate Kanäle verarbeiten und führt bei einem Auslesevorgang folgende Arbeitsschritte aus (Abbildung 5.4).

1. Vorverstärker: Die gemessenen Signale werden von einem Operationsverstärker (AMP1) verstärkt und mit einem anschließenden Polaritätsverstärker (*polarity amplifier*) gegebenenfalls invertiert. Somit ist der Aufbau unabhängig davon, ob Anoden oder Kathoden an den RENA Chip angeschlossen sind. Leider erfolgt die Invertierung nur für alle Kanäle gleichzeitig, was bedeutet, daß mit einem einzigen Chip Anoden und Kathoden nicht gemeinsam ausgelesen werden können.
2. Puls Shaper: Ein detektiertes Ereignis erzeugt einen Puls mit steilem Anstieg und exponentiell abfallendem Verlauf. Wird ein weiteres Ereignis von einer Elektrode detektiert, bevor das vorhergehende vollständig abgeklungen ist, so wird das Signal auf das vorhanden Energieniveau aufaddiert und ergibt ein überhöhtes Signal. Dieser Effekt wird auch als *pile up* bezeichnet. Ein *Puls Shaper* formt die Energiewerte in kurze Impulse um, bei denen nur die Amplitude des Peaks, relativ zum vorhergehenden Energieniveau, ausgewertet wird.
3. Peak Detektor: Der Peak Detektor koppelt das empfangene Signal vom Detektoreingang ab und ermittelt die Amplitude der vom *Puls Shaper* umgeformten Signale. Soll ein analoger Kanal am System Interface ausgelesen werden, so wird das Signal durch den *Puls Shaper* und den *Peak Detektor* nicht verändert und direkt weiter an das System Interface geleitet, wo es über den analogen Ausgang ausgelesen werden kann.
4. Schwellendiskriminatoren: Die unteren und oberen Schwellendiskriminatoren, auch *Threshold* und *Overload Comparator* genannt, entscheiden über die Gültigkeit eines Signals. Der *Thres-*

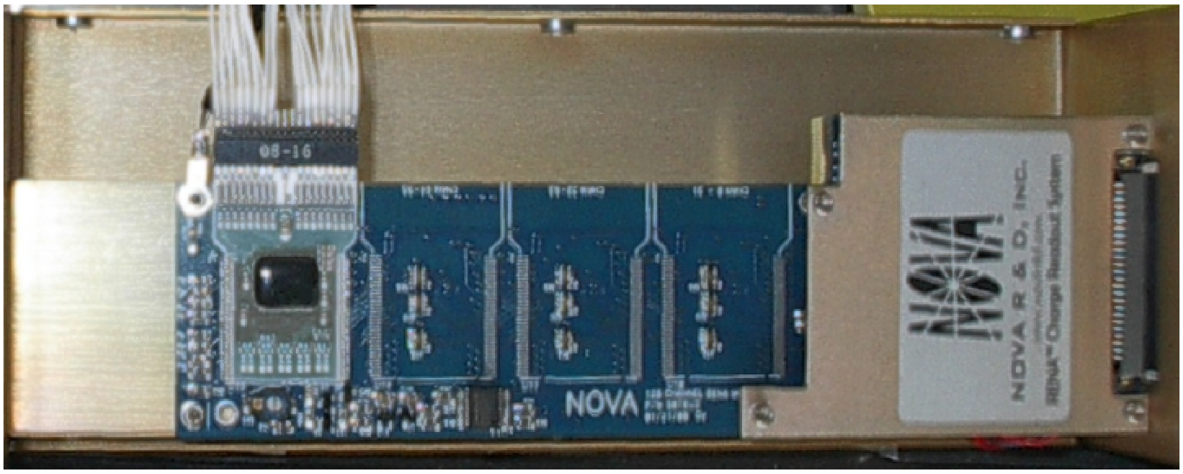

Abbildung 5.5: Draufsicht auf das im IAAT verwendete RENA Board. Rechts befindet sich der PCI-Bus Anschluß, der zum System Interface führt. Deutlich kann man die 4 möglichen Positionen für die RENA Chips erkennen. Links sind 32 Kanäle des Detektors an den RENA Chip angeschlossen.

hold Comparator überprüft dabei, ob sich der Energiewert über einer unteren Grenze befindet, mit der ein reales Signal vom Rauschuntergrund unterschieden werden kann. Der *Overload Comparator* setzt die obere Grenze des gültigen Meßbereichs fest und überprüft, ob sich das gemessene Signal in diesem Bereich befindet.

Ist das Signal in Ordnung, so wird es über einen Datenbus an einen Analog/Digital (A/D) Wandler geleitet, wo es in ein digitalen Wert umgewandelt wird. Anschliessend wird es über ein spezielles Bus-Kabel in Form von Halbbytes, den sogenannten *Nibbel*, zum RENA System Interface geschickt. Ein einzelner Hit besteht dabei aus 40 Bits (Abbildung 4.1) und wird in 10 einzelne Pakete unterteilt. Auf einem handelsüblichen RENA Board können bis zu vier Chips installiert werden, wobei auch Versionen mit nur zwei Chips pro Board vorkommen. Boards mit nur zwei Chips werden zum Beispiel bei einem vergleichbaren Aufbau beim CASS/UCSD verwendet. Maximal acht Boards können mit einer Datenleitung verbunden werden, wobei das letzte Board über Terminator-Widerstände abgeschlossen sein sollte. Die weitere Datenverarbeitung findet dann im System Interface statt.

Das RENA Board am IAAT, das als Grundlage für diesen Aufbau gedient hat, besitzt zur Zeit nur einen einzigen RENA Chip (Abbildung 5.5). Somit können die Anoden und Kathoden nicht gleichzeitig ausgelesen werden. Dies führt dazu, daß keinerlei Information über den Auftreffort des Photons im Detektor gemacht werden kann. Es ist vorgesehen, einen zweiten RENA Chip für das vorhandene RENA Board zu kaufen, mit dem dann eine Ortsauflösung in 2 Dimensionen möglich ist und somit reelle Testbedingungen für den EPP möglich sind. Dieser Chip soll auf der dritten Position auf dem RENA Board angebracht werden. Somit lassen sich die Schwellspannungen für jeden RENA Chip einzeln einstellen (siehe Abschnitt 5.1.4).

5.1.3 System Interface

Die RENA System Interface Einheit ist die Schnittstelle zwischen RENA Boards und dem Laborcomputer. Zusätzlich ist sie für das Auslesen der RENA Chips zuständig, stellt die Spannungsversorgung

Abbildung 5.6: Die Vorderansicht des RENA System Interface. Man erkennt deutlich die drei Anschlüsse für Detektor-Spannung, analogen Ausgang und externes Triggersignal, sowie die 8 LEDs, die den Zustand des Systems beschreiben (Tabelle: 5.1).

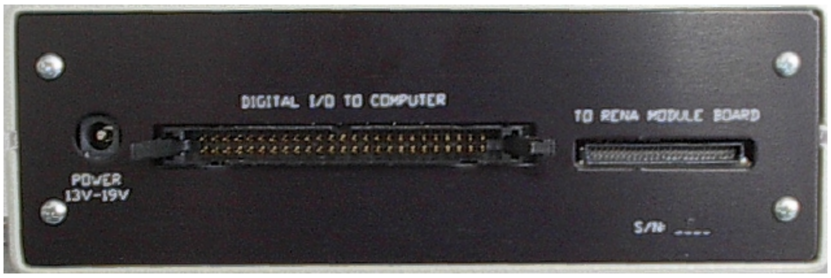

Abbildung 5.7: Die Rückansicht des RENA System Interface. Man kann die Anschlüsse für das 50-polige Kabel zum Laborcomputer, den PCI-Bus für die RENA Boards und die Spannungsversorgung für das System Interface sehen.

der RENA Boards und einen analogen Ausgang für Analysezwecke zu Verfügung. Die Spannungsversorgung des System Interfaces erfolgt über ein eigenes Netzteil, das eine Spannung zwischen +13 und +19 Volt erzeugt. **Die Spannung für das RENA System Interface sollte keinesfalls mehr als +20 V betragen, da es ansonsten zu Schäden in der Elektronik kommen kann.** Falls die Spannungsversorgung abfällt oder es zu unerwarteten Spannungsschwankungen kommt, schaltet sich das System Interface automatisch ab. Die Verbindung zum Computer erfolgt über ein 50-poliges Kabel, das an eine digitale I/O Karte von *National Instruments* angeschlossen ist, auf die im folgenden Abschnitt noch genauer eingegangen wird. Die Verbindung zu den RENA Boards ist über ein PCI-Bus Kabel hergestellt, auf dem die Kommandos an den Detektor und die gemessenen Ereignisse in Form von Nibbel übertragen werden.

Die Datenübertragung

Das System Interface sendet alle Kommandos mit drei Nibbel, dies entspricht 12 Bits, an ein oder mehrere RENA Boards. Wie bereits erwähnt, wird am IAAT nur ein RENA Board eingesetzt. Wird ein RENA Board direkt angesprochen, so besteht der erste Nibbel aus der entsprechenden *Board ID*. Die zweiten und dritten Nibbel sind Befehle, die das entsprechende Kommando an das Board weitergeben. Bei globalen Befehlen, d.h. Befehlen die alle Karten gleichzeitig ansprechen, wie z.B. das Reset der Kanäle, wird der erste Nibbel von den Boards nicht weiter ausgewertet. Werden einzelne Boards direkt

Tabelle 5.1: Bedeutung der einzelnen LEDs am RENA System Interface.

HIT	Datentransfer vom RENA Board
AF (almost full)	32 Hit FIFO Zwischenspeicher ist voll, Datenverlust möglich
E (empty)	32 Hit FIFO Zwischenspeicher leer
RXI (receive interrupt)	Daten werden an das RENA Board gesendet
TXI (transmit interrupt)	Daten werden an den Computer gesendet
MBD (module board done)	RENA Boards sind konfiguriert
IOG (I/O grant)	System Interface ist bereit
RDY (ready)	Messung kann gestartet werden

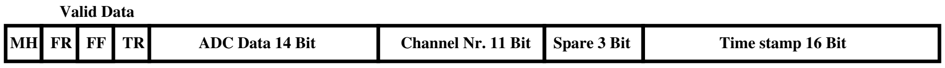

Abbildung 5.8: Struktur eines abgespeicherten Hits im RENA Board Format. Im Vergleich zum Rohformat sind 4 weitere Bits bei der *Channel Nr.*, 3 zusätzliche *Spare Bits* und das *More Hit* Bit hinzugekommen.

angesprochen, z.B. für das Auslesen, so werden zwei Nibbel als Antwort vom RENA Board gesendet, sogenannte *Acknowledgements*, bevor der gewünschte Befehl ausgeführt wird. Ein gemessener Hit ist 40 Bit lang und wird mit 10 Nibbel vom RENA Board an das System Interface übertragen. Im System Interface wird in das Hit Paket die zugehörige Board ID, sowie drei leere *Spare Bits* und ein weiteres Kontrollbit, der sogenannte *More Hits* (MH) Bit, eingefügt. Dieser MH Bit zeigt an, ob die folgenden übertragenen Ereignisse vom gleichen detektierten Photon erzeugt wurden. Die *Spare Bits* sollten in zukünftige Anwendungen eingesetzt werden, haben aber im aktuellen Design keinerlei Funktion. Das Datenpaket, welches letztendlich an den Computer übertragen wird, besitzt eine Länge von 48 Bits (Abbildung 5.8.

Äußerer Aufbau des System Interface

Das System Interface besteht aus einer Platine, die in einem metallischen Gehäuse eingebaut ist, um den Einfluß von elektromagnetischer Strahlung zu minimieren. An der Vorderseite des System Interface befinden sich 8 LEDs, jeweils ein Anschluss für das Detektor BIAS, ein analoger Ausgang, ein Eingang für ein externes Triggersignal, sowie ein Reset Knopf, welcher das System Interface und die angeschlossenen RENA Boards in einen Grundzustand versetzt und dabei alle vorhandenen Daten löscht (Abbildung 5.6). An der Rückseite befinden sich die Anschlüsse für das RENA Board und den Laborcomputer, sowie die Spannungsversorgung für das System Interface und die RENA Boards (Abbildung 5.7). Tabelle 5.1 zeigt die Bedeutung der verschieden LEDs an.

Wenn das System Interface betriebsbereit ist, leuchten die MBD, IOG und RDY Dioden. Wenn die Spannung zusammenbricht, oder es zu einem Problem bei der Verbindung zwischen RENA Boards, System Interface und Computer kommt, bleiben die LEDs ausgeschaltet. Das gesamte System muß mit einem Neustart des *Data Acquisition Programms* neu initialisiert werden.

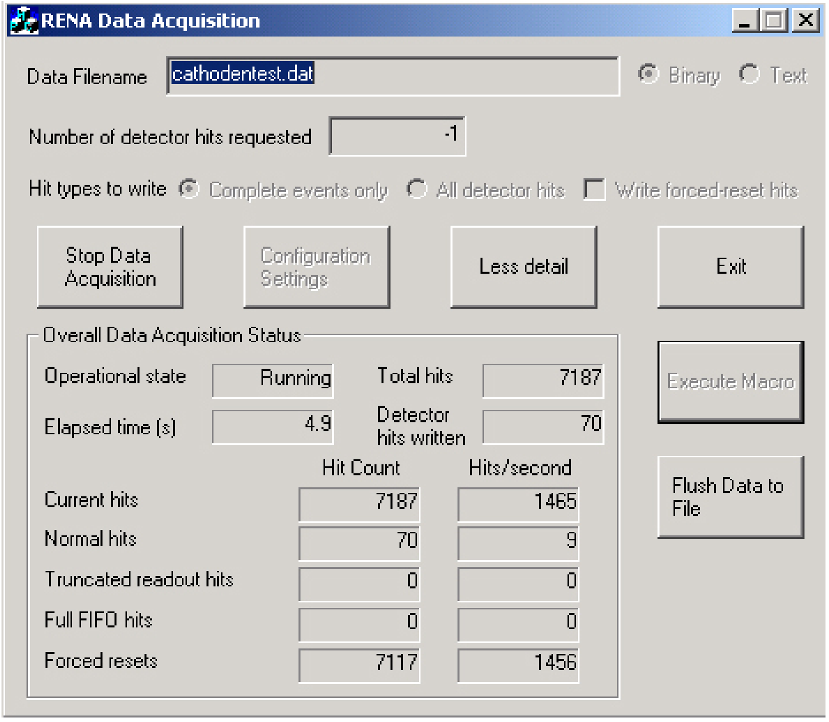

Abbildung 5.9: Startfenster des *Data Acquisition Programms*

5.1.4 Laborcomputer und Software

Für den Betrieb wird ein 400 MHz PC mit dem Betriebssystem Windows 2000 verwendet. Da die Datenspeicherung nicht sehr viele Prozessorresourcen verbraucht, genügt dieses System vollständig den hier gestellten Anforderungen. In den Computer ist eine digital I/O Karte von *National Instruments*, mit der Bezeichnung PCI-DIO-96, eingebaut. Diese Karte erlaubt es, dem Testcomputer als digitaler *I/O System Controller* für die RENA Hardware zu dienen und die empfangenen Datenpakete über den internen PCI-Bus auf die Festplatte zu schreiben.

Für die Datenaufnahme wird die *Data Acquisition Software* (DAQ) verwendet, welches ebenfalls von NOVA R&D entwickelt wurde. Es ermöglicht das Abspeichern von gemessenen Daten im *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) oder Binär Format und wird ebenfalls für die Konfiguration der RENA Chips eingesetzt. Im Binär Format wird der 48 Bit lange Hit in dem in Abbildung 5.8 gezeigten Format abgespeichert, wobei die Vergrösserung um 8 Bit auf die hinzugefügte Board ID, die drei leeren *Spare Bits* und das MH Bit zurückzuführen ist. Im ASCII-Format wird für jeden einzelnen Hit eine separate Zeile geschrieben, wobei die Kontrolbits in der Form von Buchstaben, als *(**f**)ull FIFO*, *(**t**)runcated readout* und *forced (**r**)eset*, angehängt werden. Die erste Zeile der Ausgabedatei besteht aus den Überschriften für die einzelnen Spalten.

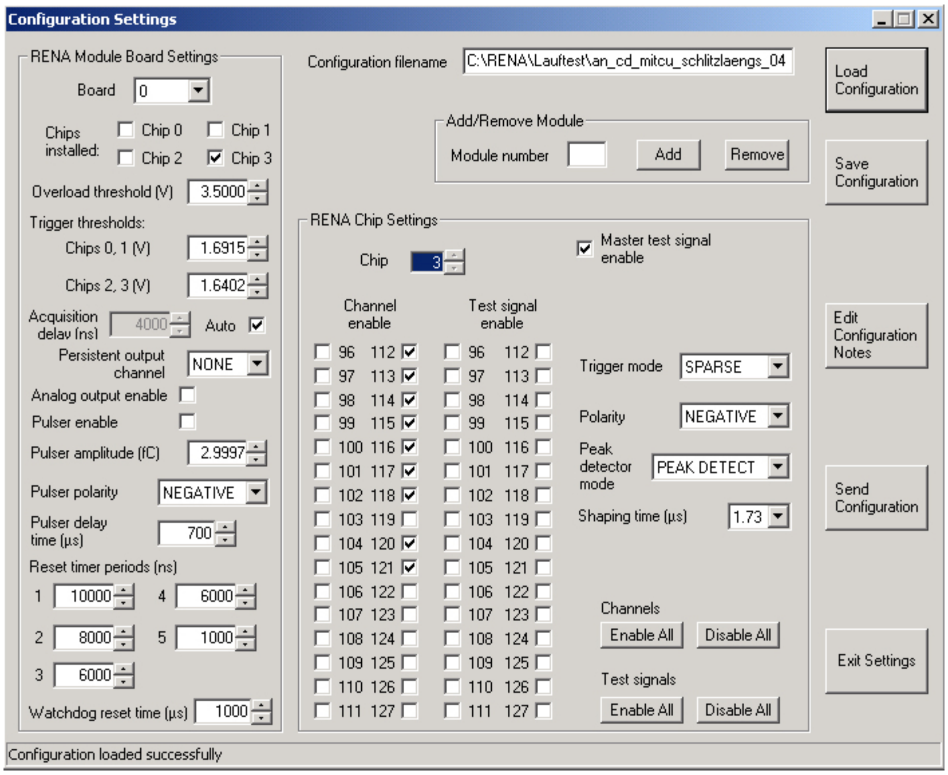

Abbildung 5.10: Konfigurationsfenster des *Data Acquisition Programms*

Data Aquisition Software

Hauptfenster

Abbildung 5.9 zeigt das Hauptfenster der DAQ-Software das beim Starten der Software erscheint. In diesem Fenster werden Dateiname, Format, maximale Anzahl gemessener Hits und der abzuspeichernde Hit Typ eingetragen. Neben der Datei mit den Messdaten wird ein Konfigurationsfile mit gleichem Dateiname und der Endung `.cfg` erzeugt. Des weiteren lässt sich in diesem Fenster das RENA Board Konfigurationsmenü öffnen und vorbereitete Makros ausführen, mit denen eine automatisierte Messung vorgenommen werden kann.

Konfigurationsfenster

Im Konfigurationsfenster lassen sich alle variablen Werte des RENA Boards und des dazugehörigen RENA Chips setzen. Bei einem Neustart müssen die Werte teilweise manuell neu gesetzt werden. Alternativ dazu lassen sich erzeugte Konfigurationsfiles importieren, in denen alle Einstellungen enthalten sind. Eine Veränderung der importierten Werte ist immer noch möglich, so daß ein bereits erzeugtes Konfigurationsfile als Grundlage für weitere Messreihen dienen kann.

Auf der linken Seite des Konfigurationsfensters werden die Einstellungen des RENA Boards gesetzt.

- Mit dem *Overload Threshold* wird der Wert des *Overload Comparator* gesetzt.

- Die *Trigger Thresholds* setzen die Werte des *Threshold Comparators*, wobei die Werte nur paarweise für Chip 0 & 1 bzw. 2 & 3 gleichzeitig verändert werden können.
- Das *Acquisition Delay* gibt an, wieviele ns nach einem eingetroffenen Ereignis bis zum Start des Auslesens vergehen sollen.
- Die *Analog Output* Option und der *Persistent Output Channel* leiten den ausgewählten Kanal als analoges Signal an den analogen Anschluss am RENA System Interface weiter.
- Die *Pulser* Optionen erzeugt ein simuliertes Eingangssignal mit gewählter Amplitude in fC an den im *Test Signal Enable* gewählten Elektroden. Um Testpulse an die Kanäle zu schicken, muß auch dsa *Master test signal* aktiviert sein.
- Bei den hier eingesetzten RENA Chips können die Polaritäten nur jeweils für den gesamten Chip geändert werden. Das bedeutet, daß man mit einem Chip nur Anoden oder Kathoden auslesen kann, jedoch nicht beide gleichzeitig. Für die Anoden ist die Einstellung *Negativ* und für die Kathoden *Positiv* zu wählen.
- Die *Reset Timer Perioden* können die Signallängen des *Reset Signals* verändern.
- Die *Watchdog Reset Time* gibt die Zeit an, nach der die Kanäle gelöscht werden, wenn kein genügend großes Signal gemessen wird, die Spannung also den *Threshold Comparator* nicht überschreitet. Das löschen der aufgestauten Ladungen sollte in regelmässigen Abständen durchgeführt werden, da es sonst bei tatsächlichen Messungen zu einem überhöhten Messwert kommt.

Die 32 *Channel Enable* Felder geben an, welche Kanäle beim Auslesen verarbeitet und schließlich abgespeichert werden sollen. Die *Trigger Mode* Option gibt, an ob nur die getriggerten Kanäle (*Spare*), die nächsten Nachbarn (*Neighbors*) oder alle Kanäle (*Global*) ausgelesen werden sollen. Bei der Polarität soll angegeben werden, ob es sich bei den gemessenen Elektroden um Anoden oder um Kathoden handelt. Gegebenenfalls wird am *Polarity Amplifier* (Abbildung 5.4) das Signal invertiert. Der *Peak Detektor Mode* gibt an, ob der Chip nur die Höhe des Signals ermitteln soll (*Peak Detect Mode*) oder ob das Signal unverändert an den analogen Ausgang des RENA System Interface weitergeleitet werden soll (*Follower Mode*). Die *Shaping Time* gibt an, wie lange die Zeit dauert, die der Peak Detektor für die Bestimmung des Maximums abwarten soll. Abschließend müssen die eingestellten Daten an die RENA Boards mit *Send Configuration* abgeschickt werden.

Im Hauptfenster kann dann die Messung gestartet werden. Dabei sollte das binäre Format bevorzugt werden, da dies weniger Festplattenplatz einnimmt. Das DAQ Programm kann nicht auf eine bestimmte Messzeit eingestellt werden. Jedoch lässt sich dieses Problem durch die Anwendung von Makros umgehen, da bei Makros eine Messzeit in Sekunden definiert werden kann, die aus der Systemzeit des Laborcomputers erzeugt wird.

5.1.5 Weiterverarbeitung der Daten

Zur Weiterverarbeitung der Daten habe ich ein IDL Programm geschrieben, welches die gemessenen Daten einliest und daraus Spektren erstellt. Dabei kann zwischen Single Events, also Ereignissen die nur auf einer einzelnen Elektrode detektiert worden sind, und allen detektierten Ereignissen unterschieden werden. Da keine Datenreduktion, wie z.B. das Zusammenfassen der Energiewerte,

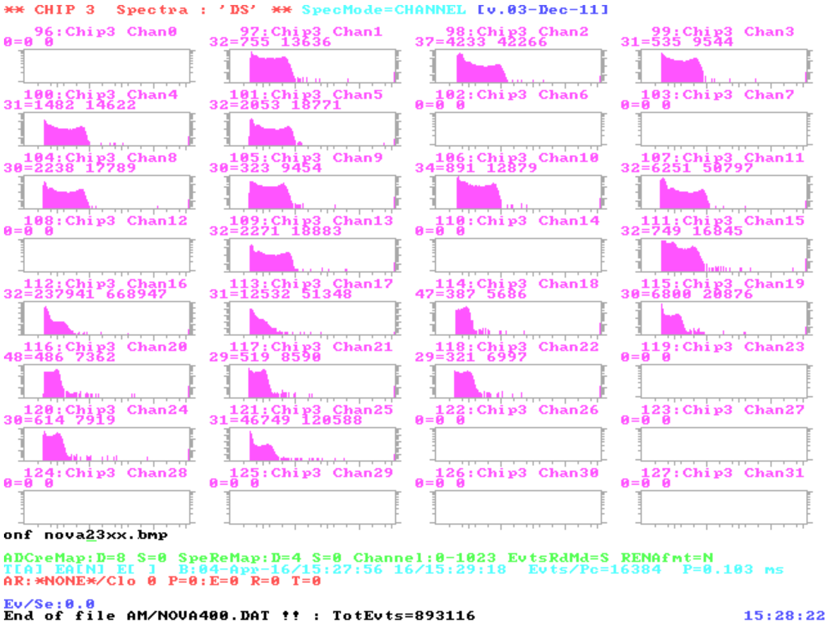

Abbildung 5.11: Übersichtsfenster der RENA *Events File Prozessor* Software, die bei CASS eingesetzt wird. Diese Abbildung zeigt ein Auswertefenster, in dem die 32 Kanäle eines RENA Chips, in diesem Fall Chip 3, gleichzeitig beobachtet werden können.

durchgeführt wird, werden für die Auswertungen vorwiegend nur die *Single Events* verwendet. Daten die sich im Binär Format befinden, werden vor dem Einlesen in das RENA ASCII Format übersetzt. Dies verbraucht zwar temporär einen größeren Festplattenplatz, jedoch wird dieser bei der Archivierung der Meßwerte eingespart. Die Übersetzung erfolgt mithilfe eines *PEARL* Skripts, welches die binären Daten einliest und im gleichen ASCII Format, wie die DAQ Software, auf die Festplatte schreibt. Anschließend wird überprüft, ob nur Single Events betrachtet werden sollen, oder ob jeder einzelne Hit separat verarbeitet wird.

Werden nur Single Events betrachtet, wird anhand des aktuellen und des vorhergehenden MH Bits ermittelt, ob der gemessene Hit nur an einer einzigen Elektrode oder an mehreren Elektroden gleichzeitig detektiert wurde.

In einer Schleife werden dann alle Hits nach einzelnen Kanälen sortiert und zu einem Energiespektrum pro Elektrode zusammengefasst. Das Ergebnis stellt die Anzahl der gemessenen Ereignisse für die jeweiligen Energiewerte dar. Eine Kalibrierung der bisherigen Elektroden für die jeweiligen Energiewerte konnte bisher noch nicht durchgeführt werden, da nicht genügend unterschiedliche Röntgeneichquellen zu Verfügung standen.

Das so erstellte Energiespektrum wird dann schließlich in einer Postscript Datei mit gleichem Namen wie das Datenfile abgespeichert.

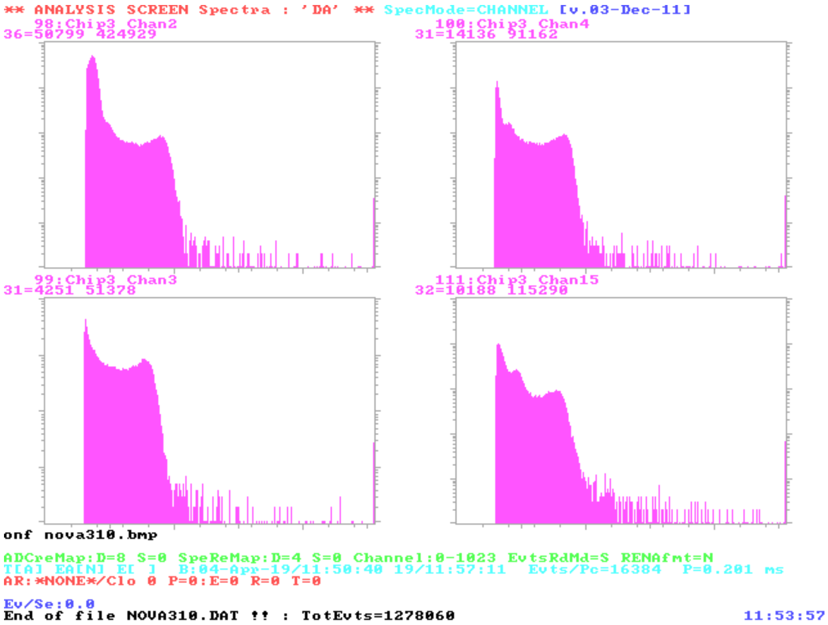

Abbildung 5.12: Das Analyse Fenster in der RENA *Events File Prozessor* Software. Es können bis zu vier unabhängige Kanäle miteinander verglichen werden. In dieser Abbildung sind die Kanäle 2, 3, 4 und 15 dargestellt.

Datenverarbeitung mit anderer Software

Während eines Besuchs im *Center of Astronomy and Space Science* (CASS) an der *University of California San Diego* (UCSD) konnte ein Einblick in das dort benutzte Programm mit dem Namen `CZTREI.EXE` für die Datenverarbeitung gewonnen werden. Dieses Programm kann die Datenmenge von 4 RENA Chips gleichzeitig verarbeiten, und somit eine zweidimensionale Darstellung der gemessenen Ereignisse erzeugen. Das Programm ist in C bzw. C++ geschrieben und erzeugt eine eigene *Microsoft-DOS* Umgebung, so daß alle Kommandos als kurze Befehlskette eingetippt werden müssen. Es befindet sich auf dem Laborcomputer im Verzeichnis `C:/UCSDProg/`. Abbildung 5.11 und 5.12 zeigen 2 Screenshots dieses Programms. Es existiert ein internes Hilfemenü, das mit den Befehlen `help` bzw. `lh` aufgerufen werden kann. Darin sind alle erlaubten Befehle und ihre Bedeutung kurz beschrieben. Für eine genauere Übersicht verweise ich auf die vorhandene Dokumentation mit dem Namen `CZTREI.DOC`, die sich im gleichen Verzeichnis wie das auszuführene Programm befindet.

5.2 Probleme beim Betrieb

Während des Aufbaus des Röntgenmeßstandes sind eine Anzahl an unvorhergesehenen Problemen aufgetreten, von denen die meisten gelöst werden konnten. Die Einflüsse, die nicht durch eine Modifikation des Aufbaus behoben wurden, können durch die Beachtung einiger Regeln bei der Messung minimiert werden.

5.2.1 Abschirmung

Der Detektor zeigt eine sehr starke Empfindlichkeit bei Lichteinstrahlung. Da es bei Lichteinfall zu Bildung von Elektron-Loch Paaren kommt, entstehen Kriechströme in den Elektroden die das gemessene Signal verfälschen. Zu diesem Zweck wurde eine Abdeckung für den gesamten Aufbau angefertigt. Die Abdeckung besteht aus 1 mm dickem Aluminium, und dient neben der Verdunkelung auch der elektromagnetischen Abschirmung des Versuchsaufbaus. Aus diesem Grund ist sie mit der Masse des gesamten Systems verbunden. Da die Abschirmung aus großen einzelnen Blechen besteht, kommt es zu einem sogenannten *Mikrophonie* Effekt. Wird die Abschirmung in Schwingung versetzt, durch leichtes Klopfen oder auch durch lautes Sprechen, kommt es im gesamten Messaufbau zu Schwingungen, die sich ein einem starken Anstieg des Rauschens wiederspiegeln. Dieses Rauschen kann an einem angeschlossenen Oszilloskop beobachtet werden. Ein vermuteter Grund für den sehr starken Anstieg sind die langen, nicht abgeschirmten Verbindungskabel zwischen Detektor und RENA Board, die diese Schwingungen auffangen und dabei dann eine Störung erzeugen. Durch einen kompakteren Aufbau, und vor allem eine Verkürzung der Verbindungskabel sollte der Einfluß der Mikrophonie entscheidend sinken.

5.2.2 Spannungsversorgung

Bei den Spannungsversorgungen kam es sowohl bei der Betriebsspannung vom RENA Board, als auch bei der Versorgungsspannung vom Detektor zu gewissen Problemen.

Spannungsschwankungen

Durch unerklärliche Spannungsschwankungen bei der Versorgungsspannung des RENA Systeminterfaces kam es zu Ausfällen während einiger Messungen. Dies kam meistens nach einer längeren Betriebsdauer der Spannungsversorgung vor, weswegen angenommen wird, das es sich dabei um thermische Effekte innerhalb der Spannungsquelle gehandelt hat. Da keine ständige Kontrolle der Apparatur im Betrieb durchgeführt wurde, weil für die langen Messungen eine ständige Anwesenheit nicht erforderlich war, konnte dieser kurze Spannungseinbruch nur durch einen Zufall beobachtet werden. Nach Austausch der anfälligen Spannungsquelle durch eine *HP 6237B* Spannungsquelle ist dieses Problem nicht mehr aufgetreten.

50 Hz Rauschen

Bei der Spannungsversorgung des Detektors, konnten mit einem, am analogen Ausgang angeschlossenen Oszilloskop Schwankungen mit einer Frequenz von 50 Hz beobachtet werden. Dabei wurde das RENA Board im *Follower Mode* betrieben, da ansonsten das Signal nicht beobachtet werden kann. Dieses 50 Hz Rauschen, mit einer Amplitude von einigen 100 mV, entsprach der Grössenordnung der tatsächlichen Signale und wurde offensichtlich durch die Netzfrequenz verursacht, an die die Spannungversorgung angeschlossen war. Mithilfe eines Frequenzfilters konnte das Rauschen weitgehend unterdrückt werden. Ein Austausch der Spannungsversorgung war dennoch notwendig, da das 50 Hz Rauschen zwar in schwächerer Form, jedoch immer noch auf einem angeschlossenen Oszilloskop beobachtet werden konnte. Mit der neuen Spannungsquelle, einem BM 95140 Labornetzgerät der Firma Rohde& Schwarz ist, konnte diese Störquelle ebenfalls vollständig ausgeschaltet werden.

5.2.3 Computer Graphikkarte

Ein weiteres Phänomen, welches mit dem Oszilloskop beobachtet werden konnte, war der Einfluß der Computer Graphikkarte auf die Spannungsversorgung des Detektors. Obwohl die Verbindungskabel zwischen Computer und Monitor, als auch zwischen Spannungsversorgung und Detektor abgeschirmt sind, kann eine Beeinflussung der Signale beobachtet werden. Es können Spannungpeaks mit einem Abstand, der der Bildschirmwiederholungsfrequenz entspricht, auf dem Oszilloskop beobachtet werden, deren Intensität abhängig von der Lage der beiden abgeschirmten Kabel ist. Durch das Ausschalten des Monitors, und der Unterbrechung der Monitorsignale von der Graphikkarte, kann dieser Effekt ohne weiteres vollständig ausgeschaltet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, das dieser Aufbau sehr empfindlich auf äußere Störungen reagiert, und dadurch die Messdaten beeinflusst. Die Messungen am IAAT wurden vorgenommen, indem für jede neue Messreihe die Spannungsversorgung und die DAQ Software neu gestartet wurden, und somit eine neue Initialisierung des RENA Boards im System Interface stattgefunden hat. Somit konnte man sichergehen, das alle Systeme bei jeder Messung gleiche Anfangsbedingungen hatten.

Kapitel 6

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse des Röntgenmeßaufbaus vorgestellt. Alle Ergebnisse wurden, soweit nicht anders angegeben, mit IDL erstellt. In Abschnitt 6.1 werden Messungen gezeigt, die mit unterschiedlich eingestellten Systemparametern gemacht wurden, um sich mit dem Aufbau vertraut zu machen und das Verhalten des Detektors bei Einstellung unterschiedlicher Parameter zu überprüfen. Abschnitt 6.2 zeigt Messungen mit einer radioaktiven Quellen und unterschiedliche Konfigurationen. Während der Diplomarbeit wurde die gesamte Datenverarbeitung neu entwickelt.

6.1 Systemparameter

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Systemparameter des RENA Board und des Detektors verändert, um das entsprechende Verhalten zu untersuchen.

6.1.1 Testpulse

Die Testpulse, die vom RENA Board erzeugt werden, können auf eine Ladung zwischen 1 fC und 8.2 fC ($= 10^{-15}$ Coulomb) eingestellt und in kurzen Zeitabständen (*pulser delay*) an das RENA Board geschickt werden. Liegt die Ladung bei sehr kleinen Werten, hängt es vom gewählten Threshold ab, ob der Detektorpeak vollständig detektiert werden kann. Dies ist abhängig von den jeweiligen Vorverstärkern eines Kanals. Abbildung 6.1 zeigt eine Überlagerung mehrerer Testimpulse bei gleichen Aufnahmezeiten und unterschiedlichen Ladungen. Bei höheren Eingangswerten kann es zu Leckströmen innerhalb der Elektronik kommen, die sich in einem kleinen *low energy tail* bemerkbar machen. Auch kann eine Verbreiterung der Energiepeaks, zu höheren ADC-Werten hin, beobachtet werden. Da jedoch die Energieauflösung eines Detektors als $\Delta E/E_0$ definiert ist, ist der hier zu beobachtende Effekt normal.

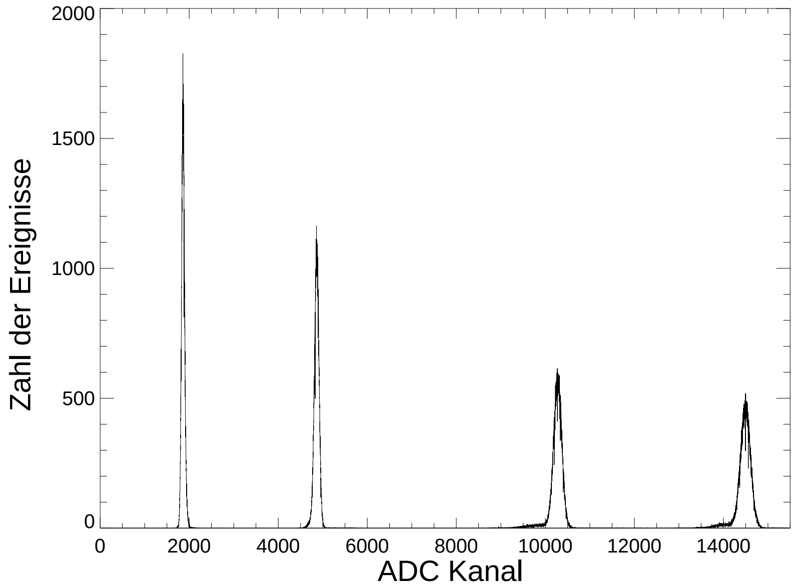

Abbildung 6.1: Die hier eingestellten Ladungen betrugen von links nach rechts 1fC, 3fC, 6fC und 8fC. Es kann eine Verbreiterung des Energiepeaks, zu höheren ADC-Werten hin, beobachtet werden. Die Messzeit, und somit auch die Anzahl der gemessenen Testpulse, ist dabei bei allen Messungen gleich gewesen.

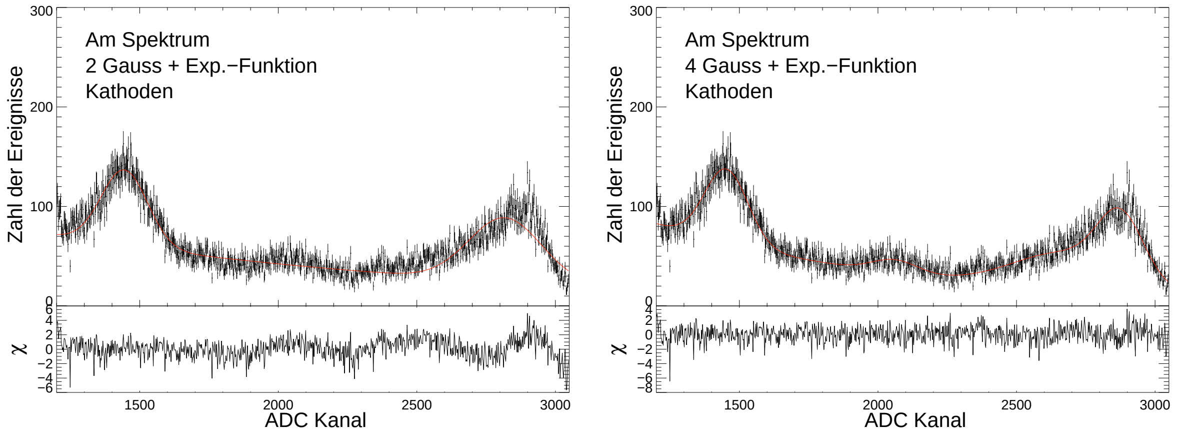

Abbildung 6.2: Links ist das gemessene Energiespektrum einer ^{241}Am Quelle mit Emissionslinien bei 59.6 keV und 17.6 keV, an die zwei Gaußkurven für die Emissionslinien und ein exponentiell abfallender Hintergrund gefittet wurden. Deutlich können die zwei *Escape Peaks* in den Residuen erkannt werden. Rechts ist die gleiche Messung, jedoch mit vier gefitteten Gaußkurven.

6.1.2 Verwendete Fitfunktion

Für die hier vorgestellten Messungen wurde eine ^{241}Am Eichquelle verwendet, die jeweils einen Energiepeak bei 59,6 keV und 17.6 keV besitzt. Zuerst wurde versucht, die gemessenen Spektren mit zwei Gausßkurven für die beiden Emissionspeaks und eine abfallende Exponentialfunktion für den Hintergrund zu fitten (Abbildung 6.2 links). Es können jedoch in den Residuen noch drei weitere Features beobachtet werden, wobei das rechte Feature durch einen verschobenen Fit des 59.6 keV Peaks entsteht. Die beiden übrigen Features sind zum einen eine Überlagerung der Cadmium und Tellur *Escape Peaks* und zum anderen ein Zink *Escape Peak* der sich im *Low Energy Tail* der 59.6 keV Emissionslinie befindet. Durch Einsatz von einer weiteren Gaußkurven für jeden dieser Features, können diese Peaks vollständig beschrieben werden (Abbildung 6.2 rechts). Die letztendlich verwendete Funktion besitzt die Form

$$f_{\mathrm{fit}} = \sum_{i=1}^{4} \frac{A_i}{\sigma_i \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2\cdot\sigma_i^2}} + Be^{-Cx+D},$$

mit den Indizes 1&2 für die Emissionspeaks, 3 für die den Cd/Te-*Escape Peak* und 4 für den Zn-*Escape Peak* mit überlagertem *Low Energy Tail*

Mithilfe dieser Messdaten wird in Abschnitt 6.2.2 die Energieeichung für die ADC Kanäle durchgeführt und die Energieauflösung des Detektors bestimmt.

6.1.3 Unterschiedliche Threshold-Werte

Eine Erhöhung des unteren Thresholds zeigt sich in einer Verschiebung des niedrigsten meßbaren Kanals hin zu höheren Energien. In der hier verwendeten Meßreihe wurde der Threshold auf einer einzelnen Elektrode, in diesem Fall eine Anode, in Schritten von 0.05 V erhöht und jeweils eine Hintergrundmessung durchgeführt. Bei sehr niedrigen Schwellen dominiert die Hintergrundzählrate und es kommt zu einem Speicherüberlauf auf dem RENA Board sowie einem *pile up*, der sich in einer Verschiebung des Hintergrunds zu niedrigeren Energien äußert. In Abbildung 6.3 kann die Abhängigkeit des untersten ADC-Kanals vom eingestellten Threshold-Wert beobachtet werden.

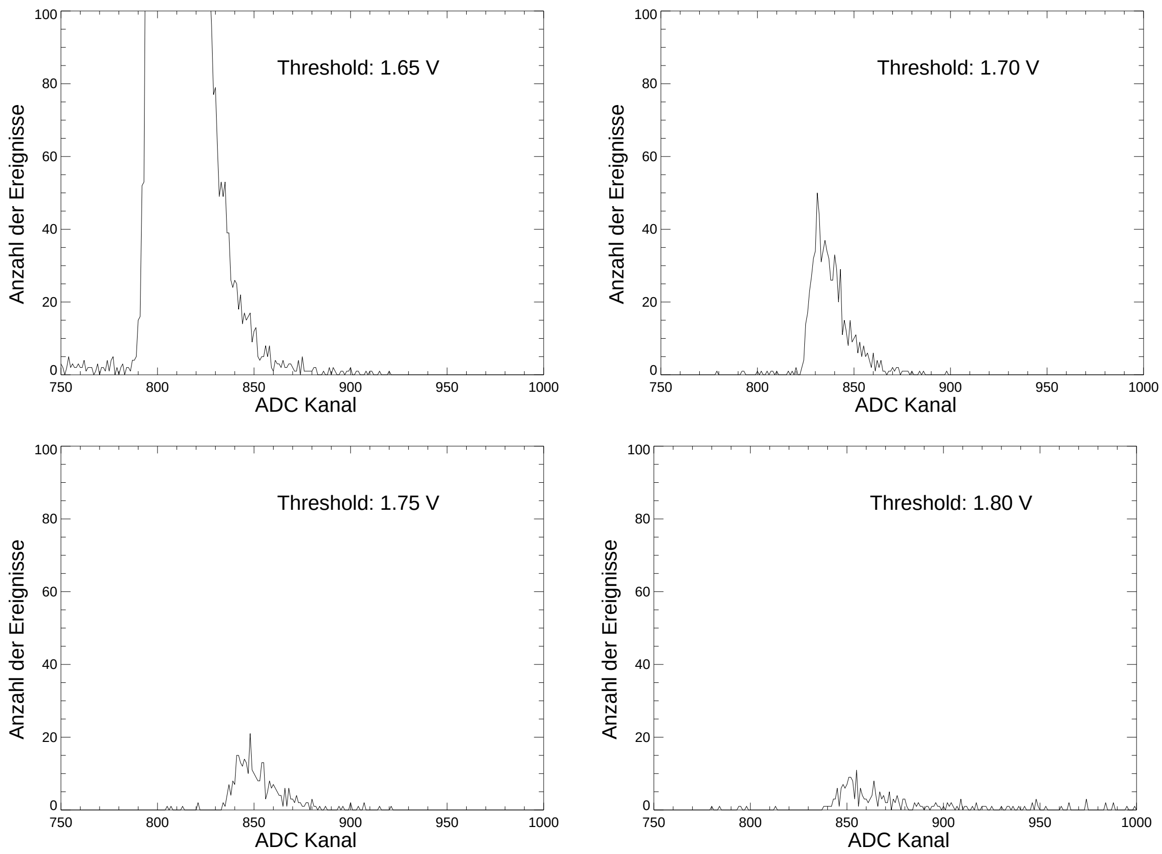

Abbildung 6.3: Hintergrundpektren für verschiedene untere Threshold-Spannungen. Deutlich kann man erkennen, daß sich der gemessene Bereich bei grösseren Threshold-Werten auch zu höheren ADC-Kanälen verschiebt. Bei einem Threshold-Wert von 1.65 V liegt das maximum bei $\approx$ 1000 Ereignissen pro Kanal.

Einzelne Ereignisse unterhalb des Thresholds entstehen dabei durch Leckströme innerhalb der Elektronik und sind somit dem elektronischen Rauschen zuzuordnen.

Durch diese Messungen kann ein minimaler Thresholdwert für jeden einzelnen Kanal gefunden werden. Da diese Werte für jeden Kanal unterschiedlich sind, aber nur eine gemeinsame untere Schwelle für alle Kanäle eingestellt werden kann, sollte sich der letztendlich verwendete Threshold am höchsten Wert der verwendeten Kanäle orientieren. Die gemessenen Threshold-Werte lagen dabei zwischen 1.55 V und 1.60 V, wobei einzelne Kanäle selbst bei 1.60 V noch einen sehr starken Hintergrund vorwiesen. Es ist daher zu empfehlen, den unteren Treshold auf mindestens 1.62 V einzustellen, und nötigenfalls sogar noch höher zu gehen, um das Hintergrundrauschen so stark wie möglich zu unterdrücken.

6.2 Messungen

In diesem Abschnitt sollen nun Messungen vorgestellt werden, die mit dem am IAAT aufgebauten Röntgenmeßstand durchgeführt wurden. Ebenfalls sollen die hier gemessenen Ergebnisse mit einer Messung, die im März 2004 am CASS/UCSD gemacht wurde, verglichen werden. Da mangels weiterer geeigneter Eichquellen nur Americium beobachtet werden konnte, ist die vorläufige Energieeichung vollständig mit dieser einen Quelle durchgeführt worden.

6.2.1 Röntgenquellen

Die am IAAT eingesetzten Röntgenquellen in einem Bereich bis 200 keV sind vorwiegend Americium (^{241}Am) und Cadmium (^{109}Cd).

^{241}Am besitzt jeweils einen Energiepeak bei 59.6 keV und 17.6 keV, die beide in den Messungen beobachtet werden konnten. Jedoch befindet sich die 17,6 kev Emissionslinie gerade im unteren Detektionsbereich, weshalb sie sich nicht bei den Anoden, die zu niedrigeren Energien verschoben sind (Abschnitt 6.2.4), beobachten lässt. Da die untere Energiegrenze von dem gewählten Threshold-Wert abhängt, kann dieser Peak auch nicht bei allen Kathoden beobachtet werden, da jede Elektrode eine unterschiedliche Verstärkung besitzt. Deswegen ist diese Emissionslinie als Eichpeak nicht sehr geeignet. Die 17,6 kev Linie kann jedoch für die Verbesserung der Energieeichung bei den Kanälen, bei denen sie auch beobachtet wird, verwendet werden. Mit einer Aktivität von $\approx 3 \cdot 10^6$ Bq ist die hier eingesetzte Quelle so stark, daß sie problemlos von den hier verwendeten Detektor gemessen werden konnte. Aufgrund der langen Halbwertszeit von 432.6 Jahren kann diese Quelle noch sehr lange als Eichquelle benutzt werden.

^{109}Cd erzeugt Röntgenstrahlung mit zwei Energiepeaks bei 22 keV und 88 keV. Die am Institut existierenden Eichquellen mit einer aktuellen Aktivität von maximal ≈ 140 Bq sind jedoch zu schwach, um von dem hier verwendeten Detektor gemessen zu werden. Da ^{109}Cd eine Halbwertszeit von nur 462.6 Tagen besitzt, sind diese Quellen im Laufe der letzten Jahre so schwach geworden, daß die emittierte Strahlung im Hintergrundrauschen untergeht. Für eine zukünftige Energieeichung sollte eine neue Quelle mit einer Aktivität von mindestens $1 \cdot 10^6$ Bq gekauft werden.

Vor kurzem wurde noch eine Kobalt (^{57}Co) Eichquelle erworben, die einen Energiepeak bei 122 keV besitzt. Die Aktivität war Anfang April 2004 $\approx 2 \cdot 10^5$ Bq, wobei die Halbwertszeit von ^{57}Co nur 271 Tage beträgt und die Eichquelle sehr schnell an Aktivität verliert. Mit dieser Quelle konnten bisher ebenfalls keine Spektren aufgenommen werden, da das Rauschen des Detektors zu groß war.

6.2.2 Vorläufige Energieeichung

Für eine ordentliche Energieeichung sollten bei dem hier eingesetzten Detektor mindestens drei signifikante Energiepeaks, die auf allen Elektroden beobachtet werden können, benutzt werden. Aufgrund der zu schwachen ^{109}Cd und ^{57}Co Quellen wird die Energieeichung mithilfe des bei ^{241}Am beobachteten 59.6 keV und des 17.6 keV Emissionspeaks, sowie den gemessenen *Escape Peaks*, die detektorspezifisch sind, durchgeführt.

Abbildung 6.4 zeigt ein Kathodenspektrum, an dem die Energieeichung durchgeführt werden kann. Wie bereits in Abbschnitt 6.1.2 beschrieben, werden an diese Messwerte vier Gaußkurven und

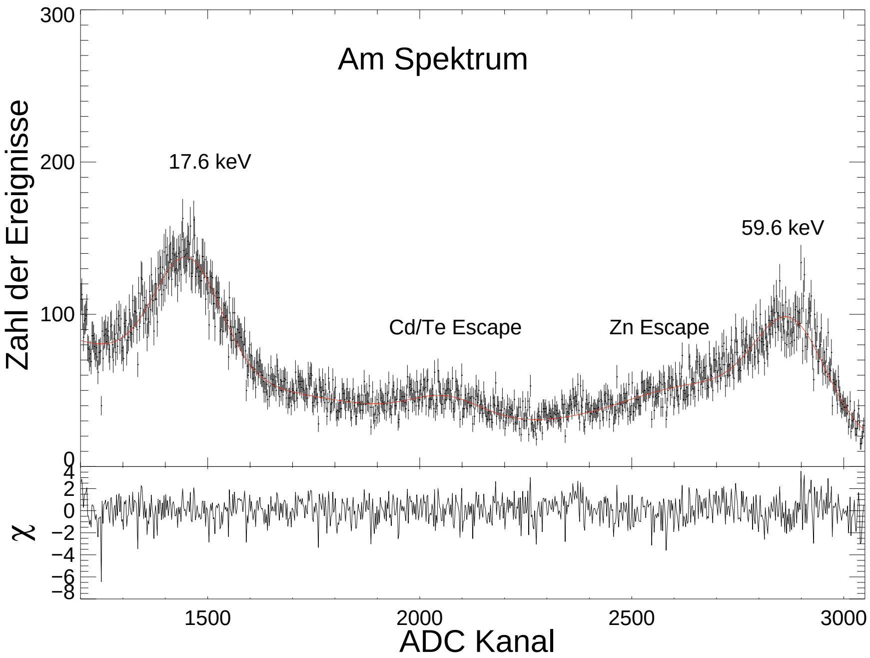

Abbildung 6.4: Für das hier dargestellte Kathodenspektrum wurde eine ^{241}Am Eichquelle verwendet. Es sind die beiden Emissionspeaks, mit den dazugehörigen Energien, und die entsprechenden *Escape Peaks* eingezeichnet.

eine abfallende Exponentialfunktion angefittet. Die jeweiligen Maxima der gefitteten Werte befinden sich bei den ADC Kanälen 1452, 2061, 2676 und 2876 und entsprechen, in der gleichen Reihenfolge, dem ^{241}Am Emissionspeak bei 17.6 keV, dem arithmetischen Mittel vom Cd- und Te-*Escape Peak* bei $\approx$ 29 keV, dem Zn-*Escape Peak* bei 50 keV und dem zweiten Emissionspeak bei 59.6 keV. Die Cd- und Te-*Escape Peaks* werden in diesen Daten zusammengefaßt, da sie nur einen Abstand von $\approx$ 5 keV haben und nicht einzeln auflösbar sind. Die gefitteten Parameter sind noch einmal in Tabelle 6.2.2 zusammgefasst.

Abbildung 6.5 oben zeigt die Zuordnung der einzelnen ADC Kanäle zu den jeweiligen Energien für das in Abbildung 6.4 ermittelte Profil. An diese Messwerte wird ein Polynom zweiten Grades gefittet, welches die nichtlineare Verstärkung des RENA Chips darstellt. Die somit ermittelten Werte lassen sich direkt für die Energiekorrektur der Elektrode verwenden. Unten in der Abbildung sind die Energieauflösungen der jeweiligen Peaks, sowohl in Einheiten der ADC-Kanäle (links) als auch in Energiewerten (rechts), gegeben. Bei den ADC-Kanälen erkennt man eindeutig die Tendenz der besseren Auflösung bei höheren Energien. Dabei weicht der Zn-*Escape Peak* stark ab, da bei diesen Energien auch ein Einfluß des *Low Energy Tails* gegeben ist, und es somit zu einer Verbreiterung des Peaks kommt.

Die Umrechnung von ADC-Kanälen zu Energien erfolgt mithilfe der jeweiligen Steigungen an den entsprechenden Energiewerten. Mithilfe der berechneten σs lässt sich das FWHM ermitteln. (FWHM $= 2.35 \cdot \sigma$). An jedem Messpunkt wird das FWHM angelegt und die enstprechenden maximalen und minimalen Energien bestimmt. Um auf die Energieauflösung zu kommen, wird nun

Tabelle 6.1: Fitparameter für die vier bestimmten Gaußkurven sowie die abfallende Exponentialfunktion.

Gaußkurven

i	A_i	x_i [ADC]	σ_i [ADC]	Entspricht
1	12922	2876	82	60 keV
2	17146	2677	190	Zn-*Escape*
3	2714	2061	82	Cd/Te-*Escape*
4	14602	1453	78	17.6 keV

Exponentialfunktion

B	C	D [ADC]	
9278	0.001	-4.72	Hintergrund

die Differenz $E_{\max} - E_{\min}$ ermittelt und durch die jeweilige Energierwerte geteilt.

Es zeigt sich, daß bei dem jetzigen Aufbau eine Energieauflösung von $15 - 20\,\%$ zu erreichen ist. Jedoch sollte eine erneute Energieeichung in einem viel größeren Energiebereich durchgeführt werden, um das nichtlineare Verhalten und somit das entsprechende Polynom, besser anzupassen. Dadurch würden sich auch genauere Energiewerte ergeben, die die berechnete Energieauflösung wahrscheinlich verbessern würde.

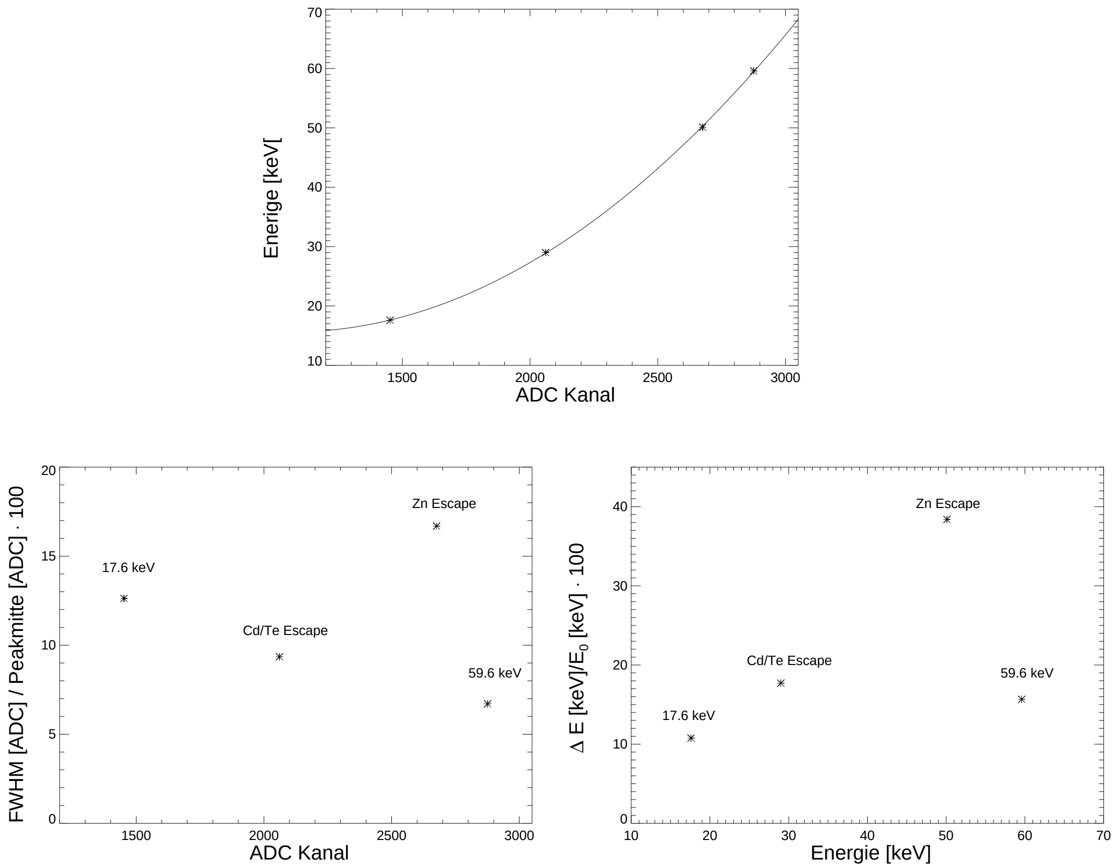

Abbildung 6.5: Messdaten, die die Energieeichung der ADC-Kanäle anhand einer Elektrode veranschaulichen. Im oberen Schaubild sind die berechneten Peaks mit ihren jeweiligen Energien aufgetragen. Da die RENA Chips eine nichtlineare Verstärkung besitzen, kann ein Polynom zweiten Grades an die Daten gefittet werden. Die unteren Bilder stellen das Auflösungsvermögen in ADC- und Energieeinheiten dar. Bei den ADC-Einheiten sieht man das typische Verhalten des besseren Auflösungsvermögen bei höheren Energien. Aufgrund der nichtlinearen Verstärkung bei den Energien kann dieses Verhalten hier nicht beobachtet werden.

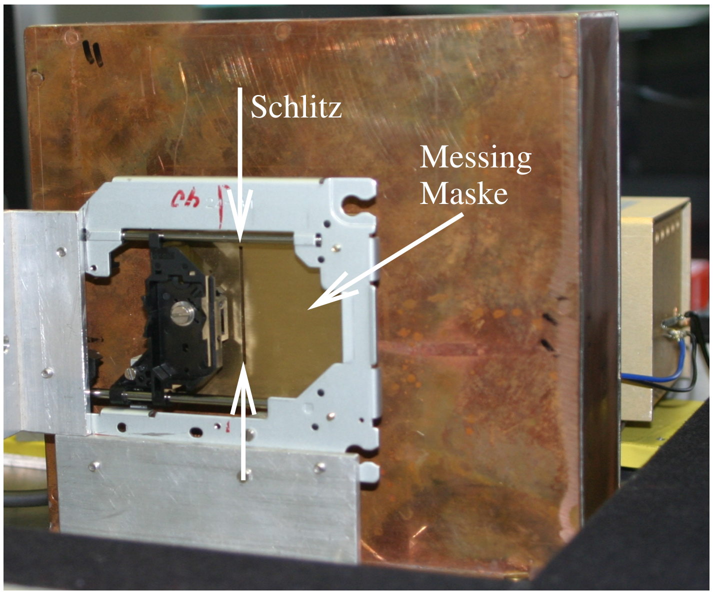

Abbildung 6.6: Diese Ansicht des Röntgentestaufbaus zeigt die 3.5 mm dicke Messingmaske mit dem 1 mm breiten Schlitz. Der Detektor befindet sich dabei innerhalb der Kupferabschirmung, die zur zusätzlichen Abschirmung hauptsächlich gegen Licht, aber auch gegen EM-Strahlung, dienen soll. Die Markierungen auf dem Maskenrahmen zeigen das Zentrum des Detektors.

6.2.3 Transporteffekte auf den Streifen

Um zu überprüfen, ob es beim Transport auf den einzelnen Elektroden zu Leckströme kommt, die sich in einer Verschiebung des Energiepeaks zu geringeren ADC Werten äußern, wurde eine Messingmaske mit einer Dicke von 3.5 mm und einem Schlitz von 1 mm Breite vor den Detektor angebracht (Abbildung 6.6). Diese Maske kann mit einer Schraube entlang einer Achse bewegt werden um somit die Lage des Schlitzes zu verändern. Somit wird nur ein kleiner Teil des Detektors bestrahlt. Die Spektren die durch die Bestrahlung in der Nähe der Auslesekontakte und auf der anderen Seite der Elektroden zustande gekommen sind, wurden miteinander verglichen um Rückschlüsse auf eventuelle Transportverluste zu erhalten.

Die Spektren in Abbildung 6.7 zeigen, daß es zu keiner signifikanten Verschiebung des gemessenen Energiepeaks kommt. Die Schwankungen in den Intensitäten lässt sich durch Abschattungseffekte erklären, die von der Maske hervorgerufen wurden. Falls Röntgenquelle und Maske nicht direkt auf einer Linie liegen, kommt es zu einem Abschattungseffekt, durch den die auf den Detektor projezierte Schlitzbreite kleiner wird Dadurch erniedrigt sich die effektiv bestrahlte Detektorfläche, und die gemessene Zählrate nimmt ab.

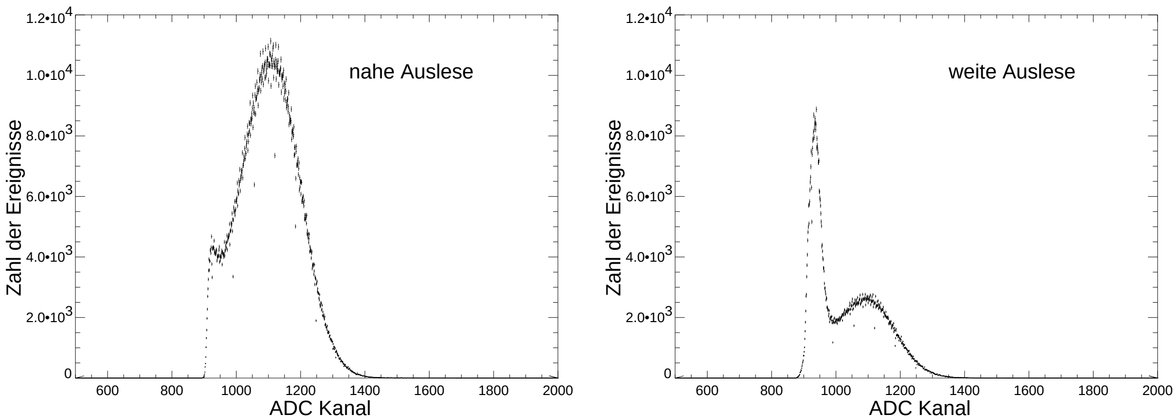

Abbildung 6.7: Dargestellt sind zwei Spektren einer einzelnen Kathode, bei der die Messingmaske aus Abbildung 6.6 einen Bereich direkt vor den Ausleseelektroden (links) und einen Bereich auf der anderen Seite des Detektors freigelassen hat. An dem detektieren Peak lässt sich keine Verschiebung beobachten. Die unterschiedliche Intensitäten lassen sich durch Abschattungseffekte der Maske, und somit einer Verkleinerung der Schlitzbreite, erklären.

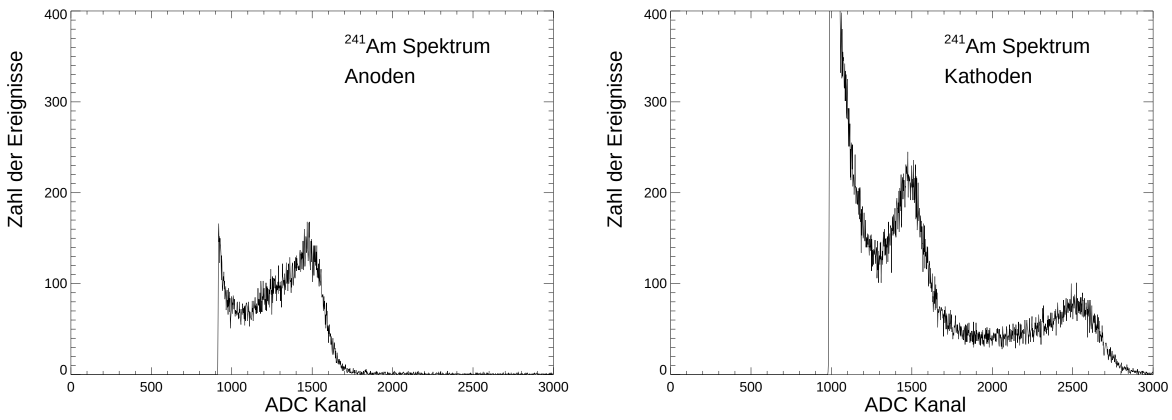

Abbildung 6.8: Die hier dargestellten Andoden und Kathodenspektren sind mit einer ^{241}Am Quelle gemacht worden. Dabei zeigt sich, das die Anoden (links) gegenüber den Kathoden (rechts) zu niedrigeren ADC-Werten verschoben sind.

6.2.4 Anoden und Kathodenunterschiede

Die Abbildung 6.8 zeigt das Anoden und Kathodenspektrum einer ^{241}Am Quelle. Es zeigt sich eindeutig, das die Anoden dabei zu tieferen Energien verschoben sind. Die Verschiebung, die man bei allen Elektroden beobachten kann, liegt dabei bei $\approx 500 - 1000$ ADC-Kanälen.

Da die Anoden die Elektronen und die Kathoden die Löcher detektieren, kann die Rekombination ausgeschlossen werden, da Elektronen eine größere Mobilität als Löcher besitzen. Ein möglicher Grund könnte der Ladungsträgerverlust durch die *Steering Elektroden* bzw. eine Verteilung der Ladungsträger auf mehrere Elektroden sein, da dies im Auswerteprogramm nicht berücksichtigt wird. Jedoch sollten in diesem Fall noch einmal eine genauere Untersuchungen erfolgen, warum dieser Effekt nur bei Anoden und nicht bei Kathoden auftritt.

6.2.5 Vergleich mit einer Messung vom CASS/UCSD

Im März 2004 habe ich das *Center for Astrophysics and Space Sciences*(CASS) an der University of California in San Diego (UCSD) besucht, um mich mit dem dortigen Detektor vertraut zu machen und über die damals vorhandenen Probleme bei der Inbetriebnahme zu diskutieren. Bei diesem Besuch wurde ebenfalls eine Aufnahme eines ^{241}Am Spektrums gemacht. Abbildung 6.9 zeigt ein Spektrum einer ^{241}Am Quelle gemessen, links mit Anode und rechts mit einer Kathode. Auch beim Aufbau in San Diego kann ein Verschiebung der Amplitudenposition des Energiepeaks von Anoden zu Kathoden beobachtet werden. Der Wert liegt auch hier zwischen 500 und 1000 ADC-Kanälen. Da bei beiden Elektroden mit dem gemeinsamen Threshold-Wert ungefähr der gleiche Kanal angesprochen wird, stammt diese Verschiebung wahrscheinlich nicht aus der Elektronik, sondern ist ein Effekt, der direkt im Detektor erzeugt wird. Wie bereits erwähnt sollte dieses Verhalten einer genaueren Untersuchung unterzogen werden.

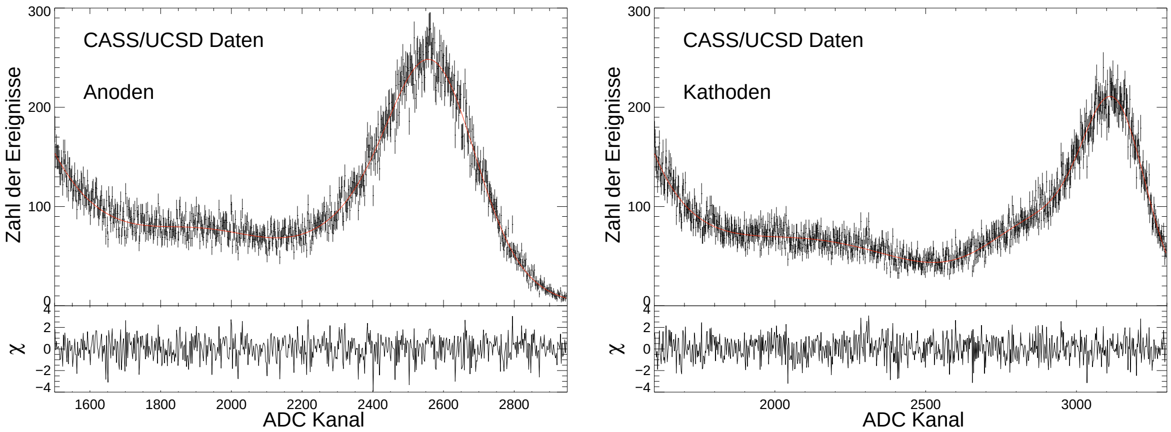

Abbildung 6.9: Spektrum einer ^{241}Am Quelle, aufgenommen mit dem Detektor am CASS/UCSD. Bei den Anoden (links) ist der Energiepeak im Gegensatz zu den Kathoden rechts um $\approx 500 - 1000$ ADC Kanäle zu niedrigeren Werten Verschoben.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde sowohl der Teil einer Testumgebung für einen Event-Pre-Prozessor (EPP) entwickelt, als auch ein Röntgenmeßstand aufgebaut, der in Zukunft das testen des EPPs unter realen Bedingugen ermöglichen soll. Dieser EPP soll als Bestandteil der *Data Processing Unit* (DPU) auf der *MIRAX* Satellitenmission die erwartete Datenmenge vor dem Transport zur Erde verarbeiten und reduzieren.

Der EPP wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Thomas Schanz, im Jahre 2001 am IAAT entworfen und wurde in den letzten Jahren erweitert und vervollständigt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Teil der Testumgebung für den EPP entwickelt, um die Funktionalität nach der Synthese zu verifizieren. Sowohl die einzelnen Module, als auch das gesamte EPP Design haben während dieser Tests problemlos funktioniert. Jedoch sind weitere Test, besonders beim *Pipelining* und bei der Echtzeit Datenverarbeitung notwendig. Ebenso muß noch die gesamte I/O Schnittstelle, die ein wichtiges Bindeglied zwischen dem EPP, dem Detektor und der zukünftigen DPU ist, entwickelt werden. Im Rahmen dieser Tests wird am IAAT ein zweiter RENA Chip benötigt, wobei bereits geplant ist diesen zu erwerben.

Der Röntgenmeßstandes wurde vollständig aufgebaut, und erste Spektren konnten erfolgreich aufgenommen werden. Zu diesem Zweck musste die Verarbeitungssoftware für die gemessenen Daten vollständig entwickelt werden. Während der Aufbauphase kam es öfters zu unvorhergesehenen Zwischenfällen, die die Inbetriebnahme des gesamten Meßstandes verzögerten. Einer der Gründe ist die extreme Empfindlichkeit des Detektors und der Verbindungskabel, die auf die kleinsten Störungen reagieren und die Meßwerte verfälschen. Es ist gelungen die meisten der vorhandenen Probleme zu lösen, bzw. so weit einzudämmen, daß sie keinen signifikanten Einfluß auf die Meßdaten besitzen. Die grundlegenden Parameter des RENA Boards und des Detektors wurden ebenfalls untersucht, und das erwartete Verhalten konnte verifiziert werden.

Die weiteren Schritte an diesem Meßaufbau würden darin bestehen, den gesamten Aufbau kompakter zu gestalten, da die langen Signalleitungen zwischen Detektor und RENA Board sehr empfindlich sind und stark zum Rauschen beitragen können. Auch sollte eine ordentliche Energieeichung des gesamten Systems durchgeführt werden, wobei aufgrund des nichtlinearen Anstiegs mindestens drei untersschiedliche Eichenergien verwendet werden sollten. Ebenso sollten äußere Einflüsse auf das RENA System genauer untersucht und die internen Vorgänge im RENA Chip besser verstanden werden. Damit könnte, nach der Fertigstellung der I/O Schnittstelle das gesamte Detektorsystem unabhängig vom Laborcomputer Daten verarbeiten und an einen Speicher weiterleiten. Bis dahin ist es aber noch ein langer Weg, auf dem die ersten Schritte gerade erst gemacht wurden.

Literaturverzeichnis

Baade, W., Zwicky, F., 1934, Proceedings of the National Academy of Science, 20, 259

Barret, D., 2001, Advances in Space Research, 28, 307

Barrett, H. H., Eskin, J. D., Barber, H. B., 1995, Physical Review Letters, 75, 156

Bell, J., Hewish, A., Pilkington, J., et al., 1968, Nature, 217, 709

Briel, U. G., Pfeffermann, E., 1985, NASA STI/Recon Technical Report N, 87, 11649

Charpak, G., Sauli, F., 1979, Nucl. Instrum. Meth., 162, 405

Cornelisse, R., Heise, J., Kuulkers, E., et al., 2000, A&A, 357, L21

Giovannini, G., Taylor, G. B., Arbizzani, E., et al., 1999, Astrophysical Journal, 522, 101

Gottesman, S. R., Fenimore, E. E., 1989, Appl. Optics, 4344–4352

Grindlay, J., Heise, J., 1975, IAU Circ., 2879, 1

Groeneveld, H., 1999, *Ph.D. thesis*, Universität Tübingen

Grupen, C., 1993, Teilchendetektoren, Mannheim: BI

Haldwell, G. D., 1994, Nucl. Instr. and Meth. A, 310, 388

Holl, P., Braeuninger, H. W., Briel, U. G., et al., 1997, Proc. SPIE, 3114, 126

Holland, A. D., Turner, M. J., Abbey, A. F., Pool, P. J., 1996, MOS CCDs for the EPIC on XMM

in 't Zand, J. J. M., Heise, J., Jager, R., 1994, A&A, 288, 665

Jager, R., Mels, W. A., Brinkman, A. C., et al., 1997, A&A Suppl., 125, 557

Jahoda, K., Swank, J. H., Giles, A. B., et al., 1996, Proc. SPIE, 2808, 59

Kalemci, E., Matteson, J. L., 2000, Proc. SPIE, 4141, 235

Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., et al., 1990, Astronomie, Springer

Knoll, G. F., 1999, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc., third edition

Kravis, S. D., Tumer, T. O., Visser, G. I., et al., 1998, Proc. SPIE, 3445, 374

Lechner, P., Eckbauer, S., Hartmann, R., et al., 1996, Nucl. Instr. and Meth. A, 377, 346

Lichti, G. G., Schoenfelder, V., Diehl, R., et al., 1996, Proc. SPIE

Lund, N., Budtz-Jørgensen, C., Westergaard, N. J., et al., 2003, A&A, 411, L231

Maeding, D. G., Tumer, T. O., Kravis, S. D., et al., 1998, Proc. SPIE, 3445, 364

Malm, H. L., 1972, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-19, 263

Matoba, M., Hirose, T., Sakae, T., et al., 1985, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-32, 541

Matsuba, E., Dotani, T., Mitsuda, K., et al., 1995, Publ. Astron. Soc. Japan, 47, 575

Mirabel, I. F., Rodríguez, L. F., 1999, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 37, 409

Philippot, J. C., 1970, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-17(3), 446

Pottschmidt, K., 2002, *Ph.D. thesis*, Universität Tübingen

Reppin, C., Pietsch, W., Trümper, J., et al., 1985, High Energy X-ray Experiment for the Saljut-Mission (HEXE), Non-thermal and Very High Temperature Phenomena in X-ray Astronomy, 279–

Rothschild, R. E., Blanco, P. R., Gruber, D. E., et al., 1998, Astrophysical Journal, 496, 538

Schanz, T., 2001, *Master's thesis*, Universität Tübingen

Staubert, R., Rothschild, R. E., Heindl, W. A., et al., 2003, Proc. SPIE, 4851, 365

Strüder, L., Barret, D., Fiorini, C., et al., 2004, Proc. SPIE, 5165, 19

Strüder, L., Briel, U., Dennerl, K., et al., 2001, A&A, 365, L18

Suchy, S., Schanz, T., Kendziorra, E., et al., 2004, Proc. SPIE, 4988, xxx

Turner, M. J. L., Abbey, A., Arnaud, M., et al., 2001, A&A, 365, L27

Ubertini, P., Lebrun, F., Di Cocco, G., et al., 2003, A&A, 411, L131

Wilms, J., 2001, *Master's thesis*, Universität Tübingen

Danksagung

Bei allen Menschen die mich während meines Studiums unterstützt haben. Besonders herzlich will ich mich bei folgenden Menschen bedanken:

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

Dr. E. Kendziorra für seine engagierte Betreuung und seine Hilfsbereitschaft.

Dr. J. Wilms, der immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatte und auf fast alle Probleme eine passende Antwort wusste.

Michael Martin, der mich während meiner Diplomarbeit und des vorhergehenden Studiums *ertragen* musste.

Giuseppe Distratis und Thomas Schanz, die sich immer Zeit genommen haben um mit mir aufgetretene Probleme zu besprechen und die Funktionsweise der RENA Chips zu ergründen.

Der Elektronik Werkstatt, und da vor allem Herr Vetter, der sehr viel Zeit und Energie eingebracht hat, um den Aufbau der Detektorplatine zu verstehen und immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Sonja Fritz, für die vielen Rechtschreib- und Kommasetzungskorrekturen.

Birigt Schröppel, ohne die meine mündlichen Prüfungen sicherlich nicht so gut verlaufen wären, für die erbrachte Geduld bei der Vorbereitung.

Allen Mitgliedern des Institutes, und vor allem den Mitgliedern der Espresso Runde, die für ein sehr angenehmes Arbeitsklima gesorgt haben.

Allen Freunden, die mich vor allem während der Endphase der Diplomarbeit unterstützt haben und Verständnis zeigten, das ich so wenig Zeit mit ihnen verbringen konnte.

Meinen Eltern, ohne die das gesamte Studium nicht möglich gewesen wäre, und die mich finanziell und persönlich auf jegliche Art und Weise unterstützt und immer an mich geglaubt haben.

Danke!