

## 4. pn-CCD - Das Herz der Missionen

Da das pn-CCD, wie sein Name schon sagt, ein Halbleiterelement ist, soll nun zum besseren Verständnis kurz auf die für dieses Bauteil grundlegenden Phänomene eingegangen werden.

### 4.1 Kleines Halbleitereinmaleins

#### 4.1.1 Leitung

Aufgrund der räumlichen Nähe vieler Atome und deren Elektronen entstehen in einem Festkörper durch die Überlagerung der einzelnen Energieniveaus der Atome sogenannte Energiebänder. In Abbildung 4-1 ist schematisch das durch die einzelnen Atomrümpfe entstehende

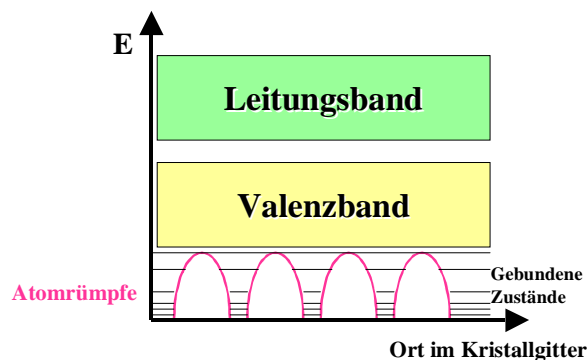


Abbildung 4-1: Zustände im Bändermodell

Potential dargestellt. Energetisch nahe bei den Atomrümpfen sind die gebundenen Zustände. Darüber entsteht durch Überlappung der Potentiale ein quasi-kontinuierliches Band, das Valenzband. Im Valenzband sind alle Energieplätze von Elektronen besetzt. Ein Elektron kann sich also nur dann bewegen, wenn ein anderes Elektron die komplementäre Bewegung durchführt. Folglich kann ein solches Band nicht zur Leitung beitragen. Soll ein Elektron zur Leitung beitragen, muß es vom Valenzband ins Leitungsband, das nicht voll besetzt ist, gebracht werden. Im Leitungsband kann es sich dann bewegen. Der Übergang vom Valenz- ins Leitungsband ist nur durch Energiezufuhr möglich.

Man bezeichnet diese Vorstellung als „Bändermodell“. Im Bändermodell besteht der Unterschied zwischen Isolatoren, Leitern und Halbleitern nur in der Größe der Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband.

Abbildung 4-2 veranschaulicht diese Unterschiede.

Bei einem Leiter wie z. B. Metall überlappen sich Valenz- und Leitungsband; d. h. bei beliebig kleinen Temperaturen können Elektronen ohne zusätzliche Energiezufuhr vom Valenz- ins Leitungsband gebracht werden. Steigt die Temperatur an, so können aufgrund der thermischen Energiezufuhr noch mehr Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband gebracht werden. Dies trägt zur

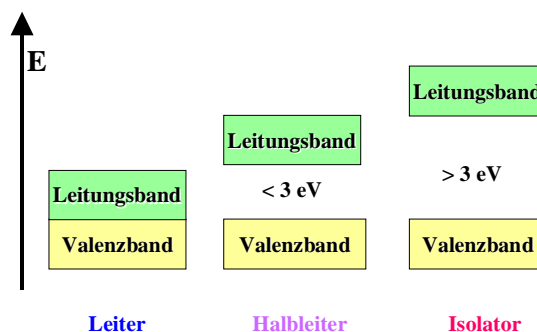


Abbildung 4-2: Leitfähigkeit im Bändermodell

Verbesserung der Leitfähigkeit bei. Auf der anderen Seite stoßen nun aufgrund stärkerer Gitterschwingungen die freien Elektronen häufiger mit den Atomen zusammen, was zur Abnahme der Beweglichkeit der Elektronen führt und die Leitfähigkeit des Materials reduziert. Der letztgenannte Effekt überwiegt bei höheren Temperaturen.

Ein Isolator zeichnet sich durch eine so große energetische Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband aus, daß keine Elektronen mehr von dem einen in das andere Band wechseln können.

Als Halbleiter werden Stoffe bezeichnet, die bei  $T = 0$  Kelvin als Isolator wirken, aber bei höherer Temperatur zu leiten beginnen. Bei 0 Kelvin beträgt die Energielücke zwischen dem Valenz- und Leitungsband beispielsweise beim Halbleiter Silizium 1,115 eV. Bei höheren Temperaturen können nun thermisch angeregte Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband vordringen und dort zur Leitung beitragen.

Halbleiter können also je nach Temperatur als Isolator oder als Leiter fungieren.

## 4.1.2 Dotierung von Halbleitern

Es ist möglich, die Leitungseigenschaften eines Halbleiters gezielt durch Beimischung von Fremdatomen zu beeinflussen.

### 4.1.2.1 n-Leitung

Silizium besitzt in der äußeren Schale vier Elektronen. Baut man nun ein Element ein, welches in der äußeren Schale fünf Elektronen besitzt, z. B. ein Phosphor-Atom, so ist im Gitter ein Elektron überzählig und folglich nur noch schwach an sein Atom gebunden. Es kann jetzt leicht vom Valenz- ins Leitungsband wechseln und dort zur Leitung beitragen. Man bezeichnet dieses Einbauen von Fremdatomen als Dotierung, das Fremdatom als Elektronendonator und die so zustande kommende Leitung als Elektronen-Leitung oder n-Leitung (negative-Leitung).

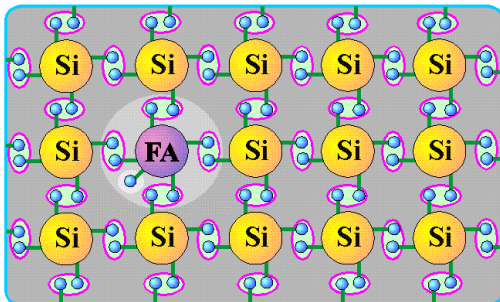


Abbildung 4-3: n-Leiter

### 4.1.2.2 p-Leitung

Nimmt man als Fremdatom ein dreiwertiges Element wie z. B. ein Bor-Atom, das in der äußeren Schale drei Elektronen hat, fehlt im Gitter ein Elektron. Es ist nun für das Bor-Atom einfach, ein Elektron aus dem Valenzband anzulagern. Folglich entsteht eine Elektronenfehlstelle. In Analogie zum Elektronendonator bezeichnet man hier das Fremdatom als Elektronenakzeptor und die Leitung als Defektelektronen-Leitung, Löcherleitung oder p-Leitung (positive-Leitung).

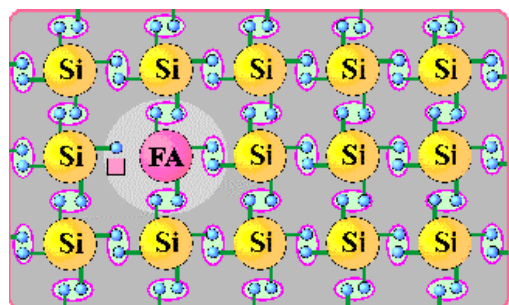


Abbildung 4-4: p-Leiter

### 4.1.3 Kontakte zwischen n- und p-leitenden Halbleitern

Bringt man einen n- und einen p-leitenden Halbleiter zusammen, so entsteht an der Berührungsstelle eine ladungsträgerarme Zone, da die Elektronen des n-Leiters mit den Löchern aus dem p-Leiter rekombinieren (Abbildung 4-5-a). Ohne äußere Spannung entsteht also ein sogenanntes Kontaktpotential.

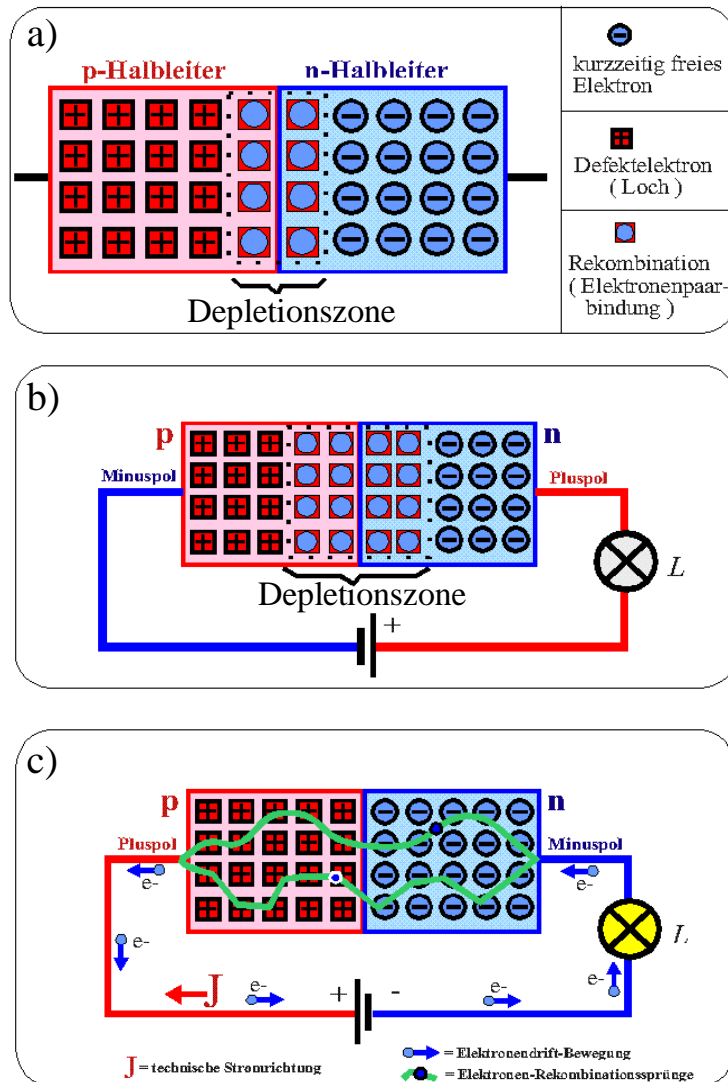


Abbildung 4-5: pn-Übergang

Legt man nun an den n-Leiter eine positive und an den p-Leiter eine negative Spannung an, vergrößert sich die ladungsträgerarme Zone, da die Elektronen in Richtung der positiven Anode und die Defektelektronen in Richtung der negativen Kathode verschoben werden. Der Widerstand zwischen n- und p-Leiter steigt an. Man spricht davon, daß der pn-Kontakt jetzt in Sperrichtung geschaltet ist (Abbildung 4-5-b).

Polt man den pn-Kontakt umgekehrt, so verkleinert sich die ladungsträgerarme Zone und der Widerstand nimmt ab. Ein Strom fließt nun zwischen n- und p-Leiter, deshalb bezeichnet man diese Art der Polung als Flußrichtung (Abbildung 4-5-c).

Die ladungsträgerarme Zone wird auch Depletionszone genannt. Einen pn-Übergang, der völlig von der ladungsträgerarmen Zone eingenommen wird, bezeichnet man als voll depletierten pn-Übergang.

#### 4.1.4 Technische Anwendungen

Populärste und weitverbreitetste Anwendung dieses Effekts ist wohl die Diode. Es handelt sich hierbei um einen pn-Übergang, der aufgrund seiner Fluß- und Sperrichtung den Strom nur in eine Richtung fließen läßt und so z. B. aus Wechselstrom Gleichstrom machen kann.

Bekannt ist auch die Leuchtdiode, bei der - wenn in Flußrichtung Elektronen mit Löchern rekombinieren - die freiwerdende Energie in Form von Licht abgestrahlt wird.

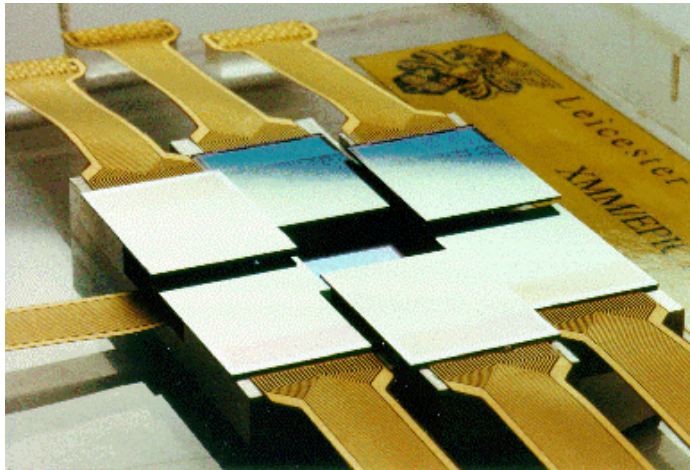
Nicht zu vergessen ist der Transistor, ein npn- oder pnp-Übergang, der die Elektronik in den sechziger Jahren revolutionierte und die bis dahin als Verstärker eingesetzte Röhre fast völlig vom Markt verdrängte.

#### 4.1.5 Innerer Photoeffekt und Halbleiterzähler

Trifft ein Photon auf einen depletierten pn-Übergang, so werden dort Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband angehoben, und es entstehen Elektronen-Loch-Paare. Dies stellt den inneren Photoeffekt dar. Die so generierten Ladungen können mit Hilfe einer Spannung abgesaugt werden und dienen dann als Maß für die aufgetroffene Strahlung. Ein pn-Kontakt kann somit dazu benutzt werden, Photonen zu detektieren. Der Halbleiterzähler ist entstanden.

### 4.2 Ein MOS-CCD

MOS steht für Metal-Oxid-Semiconductor. Das bedeutet, daß bei diesem Detektorsystem auf einem Halbleiter Metalloxid-Anoden bzw. -kathoden angebracht sind, durch die auf den



**Abbildung 4-6: MOS-CCD-Array**

Halbleiter Spannungen gegeben werden können. Es handelt sich um eine schon länger bekannte Technik, die beim MOS-CCD für XMM von der Universität Leicester in Zusammenarbeit mit der Firma EEV in Großbritannien wieder angewandt wird. Die MOS-CCD-Arrays (Abbildung 4-6) auf XMM sind aus sieben einzelnen MOS-CCDs aufgebaut, wobei jedes CCD aus  $600 \times 600$  Pixeln besteht. Die Pixel haben eine Geometrie von  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  bei einer Schichtdicke von  $100 \mu\text{m}$ . Diese verhältnismäßig kleine Schichtdicke ist verantwortlich dafür, daß die Nachweiswahrscheinlichkeit bei größeren Energien der Röntgenstrahlung sehr unbefriedigend ist. Beispielsweise liegt die Nachweisempfindlichkeit für ein einfallendes Röntgenquant der Energie 8 keV nur noch bei 65%. Will man eine zeitlich variable Röntgenquelle auflösen, so erreicht das MOS-CCD im besten Fall eine Auflösung von einer Millisekunde. In der Energieauflösung erreicht ein MOS-CCD z. B. bei einem 2-keV-Photon 80 eV und bei einem 6-keV-Photon 130 eV. Ausgezeichnet wird das MOS-CCD durch seine gute Ortsauflösung.

## 4.3 Das pn-CCD

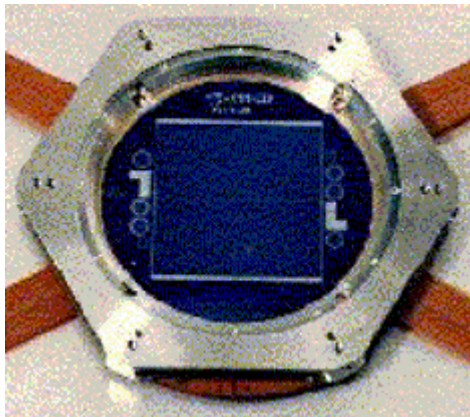


Abbildung 4-7: pn-CCD-Array

Nun zu dem in München eigens für XMM und ABRIXAS entwickelten pn-CCD und seinen Besonderheiten. Abbildung 4-7 zeigt ein vollständiges Array aus zwölf pn-CCDs, das im Kamerakopf als Detektor fungieren wird. Das blaue Quadrat im Innern stellt das Array dar (siehe 3.5.1). Der das Array umgebende Metallring dient zur Befestigung des CCD-Arrays am Kamerakopf, und die vier braunen Streifen sind die Kabelzuführungen für die vier Quadranten des CCD-Arrays, die wie in 3.5.1 schon angesprochen alle über eine eigene Ausleseelektronik verfügen und somit redundant sind.

### 4.3.1 Vom pn-Übergang zum pn-CCD

#### 4.3.1.1 Seitwärtsdepletion

Tritt ein Photon in einen depletierten pn-Übergang ein, so generiert es dort Elektron-Lochpaare und deponiert so seine Energie im Halbleitermaterial. Wird von außen eine Spannung an den pn-Übergang angelegt, ist es möglich, diese Ladungen abzusaugen, bevor sie wieder rekombinieren. Auf diese Weise erhält man eine Information über das eingetretene Photon. Will man mit einer solchen Anordnung Röntgenphotonen detektieren, muß man beachten, daß die Röntgenphotonen aufgrund ihrer hohen Energie tief eindringen können, bevor sie Elektron-Lochpaare generieren. Deshalb muß die Depletionszone des pn-Übergangs entsprechend groß sein. Dies erreichte man am Halbleiterlabor des MPI in Pasing mit der Methode der Seitwärtsdepletion: Auf einen n-dotierten Siliziumwafer wird auf Ober- und Unterseite eine p-Schicht aufgebracht, wodurch (wie in Abbildung 4-8 zu sehen) zwei Depletionszonen entstehen. Legt man nun eine

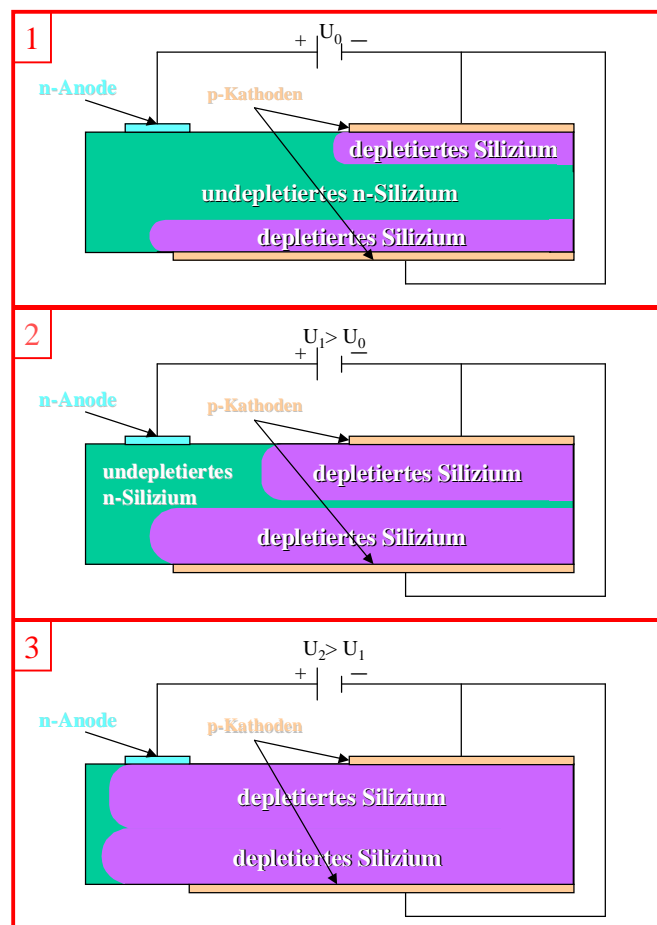


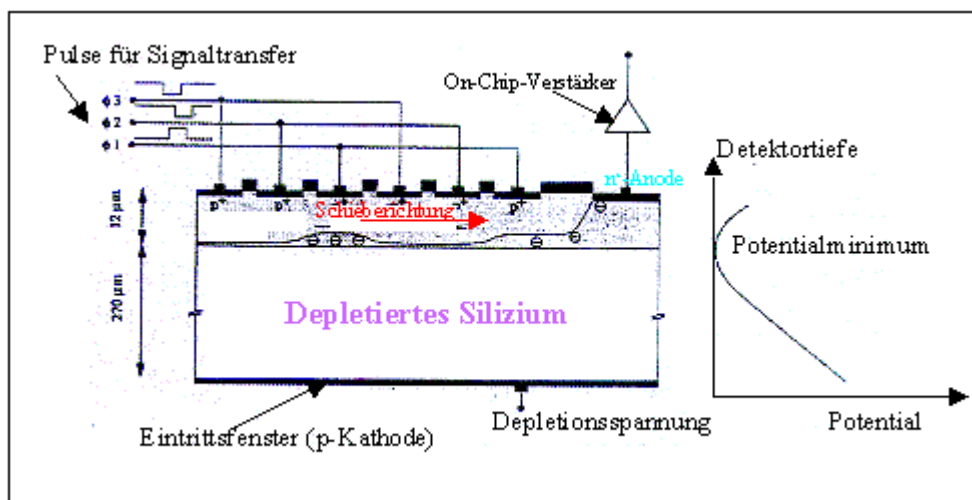
Abbildung 4-8: Prinzip der Seitwärtsdepletion



zusätzliche Sperrspannung zwischen den p-Schichten und der n-Schicht an, so verbreitern sich die Depletionszonen. Wenn die angelegte Spannung richtig dimensioniert ist, verschmelzen die beiden Depletionszonen zu einer einzigen. Mit dieser Methode erreicht man die Depletion des gesamten CCDs mit einer Tiefe von  $280\mu\text{m}$ . Liegen die p-Schichten auf gleichem Potential, bildet sich das Potentialminimum in der Mitte der n-Schicht aus. Durch unterschiedliche Potentiale an den p-Schichten kann folglich die Lage des Potentialminimums verschoben werden. Dies ist für das pn-CCD besonders wichtig, denn man will ein Potentialminimum in direkter Nähe der oberen p-Schicht erreichen, was sich für den Ladungstransfer als günstig erweist.

#### 4.3.1.2 Pixelstruktur und Ladungstransfer

Das in 4.3.1.1 beschriebene System stellt einen pnp-Übergang dar, der es ermöglicht, Aussagen über die Energie eines eintreffenden Photons zu machen. Für die Astronomie ist es darüber hinaus sehr wichtig zu wissen, woher die Photonen kommen und in welchen zeitlichen Abständen sie auftreten. Um auch diese Informationen erhalten zu können, macht man den Schritt vom pnp-Übergang zum pn-CCD. Dazu muß man beim pnp-Übergang eine der p-Schichten in Streifen aufteilen (als Vorderseite des CCDs bezeichnet), und eine p-Schicht unverändert lassen (Rückseite genannt). Die Rückseite legt man gegenüber der Vorderseite auf eine negatives Potential und erreicht so, daß ein Potentialminimum in unmittelbarer Nähe der Vorderseite entsteht. Treffen jetzt Photonen ein, werden sich die von ihnen generierten Elektronen im Potentialminimum sammeln.



**Abbildung 4-9: Schieben & Pixelstruktur**

Durch unterschiedliche Spannungen (genannt Phi-Pulse) an den drei Streifen lassen sich sogenannte Potentialmulden erzeugen, in denen Elektronen gesammelt werden können. Variiert man nun noch zeitlich die Spannungen, kann man die Potentialmulden senkrecht zu den „p-Streifen“ über das CCD wandern lassen und die darin gefangenen Elektronen über das CCD transportieren. Dieser Vorgang wird als Schieben bezeichnet (siehe auch Abbildung 4-9).

Um einzelne Pixel bilden zu können, werden senkrecht zu den p-Streifen als „Channelstops“ bezeichnete Sperrschichten eingebaut, die verhindern, daß Ladung seitlich wegfließen kann. Man realisiert die Chanellstops durch Ionenimplantationen. Diese Ionenimplantationen erzeugen Raumladungszonen, die für die Elektronen Potentialbarrieren darstellen. So wird

durch die ortsfesten Potentialbarrieren und die senkrecht dazu beweglichen Potentialmulden das eigentliche Pixel mit einer Fläche von  $150\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$  erzeugt. Die Spannung zwischen Vorder- und Rückseite bezeichnet man als Rückkontaktspannung. Sie wird im Flugmodell -180 V betragen. Rechnet man jetzt zurück, welche Ladung wann aus welchem Pixel kam, so erhält man die gewünschte Information nach Ort, Zeit, und Energie.

Das pn-CCD ist entstanden.

### 4.3.2 CCD-Design

Das nach obigen Kriterien entwickelte CCD sieht in seiner endgültigen Version schematisch folgendermaßen aus (Abbildung 4-10):

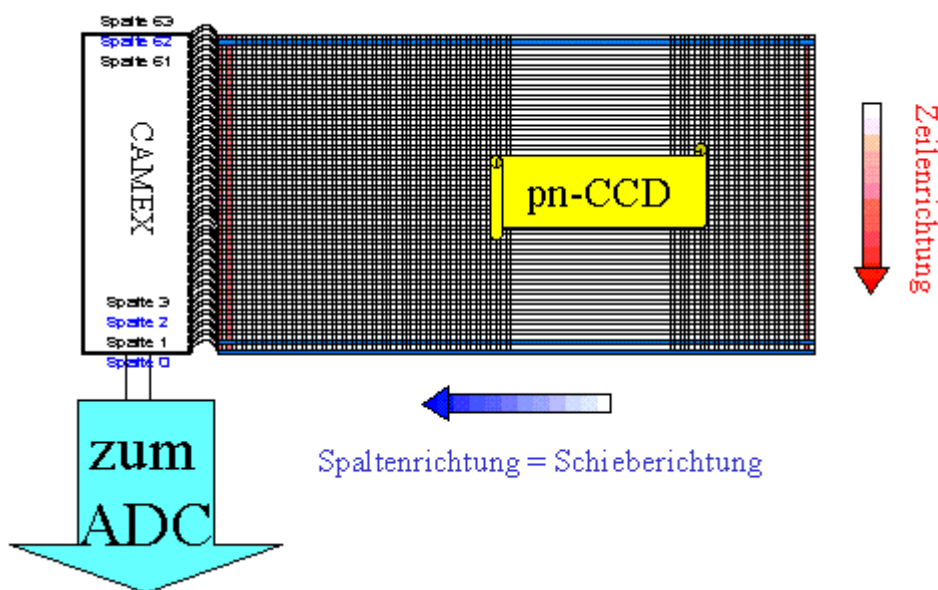


Abbildung 4-10: CCD-Design (schematisch)

Die in 4.3.2 angesprochene Anordnung von drei p-Streifen bezeichnet man als Zeile, die dazu senkrechten Anordnungen als Spalten. Mit 200 Zeilen und 64 Spalten enthält jedes CCD 12800 Pixel. Daraus ergibt sich für das CCD eine Größe von  $30\text{ mm} \times 9,6\text{ mm}$ . Man numeriert die Spalten von 0 bis 63, die Zeilen von 0 bis 199.

### 4.3.3 CAMEX und TIMEX

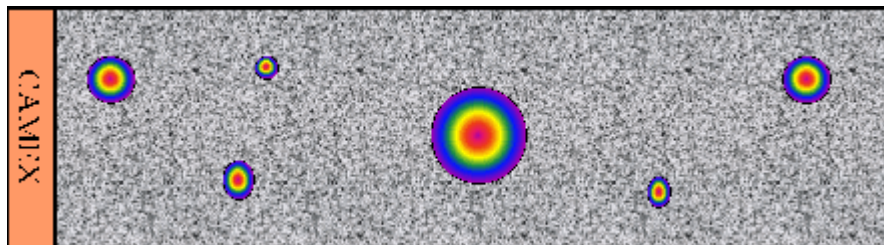
Sobald die Ladungen an den Ausleseanoden des CCDs ankommen, werden sie in Spannungen umgewandelt und verstärkt. Eine erste Vorverstärkung findet noch auf dem CCD selbst statt, und zwar mit Hilfe der 64 JFET-Sourcefolger, die das Signal an den CAMEX, einen hochintegrierten Verstärkerchip, weitergeben. Der CAMEX (CMOS Amplifier and Multiplexer Chip), der auf der CCD-Platine angebracht und durch Bond-Drähte mit den 64 JFETs des CCDs verbunden ist, verstärkt das Signal weiter. Danach wird eine Offset-Korrektur und Rauschfilterung durchgeführt. Das korrigierte Signal wird nachverstärkt und seriell auf den Eingang eines Analog Digital Wandlers gegeben. Der TIMEX (Timing-CAMEX) liefert die zur zeitlichen Steuerung des CAMEX notwendigen Pulsfolgen.

## 4.4 Modes

Es existieren vier Modes, in denen das CCD betrieben werden kann. Bei ABRIXAS wird von diesen vier Modes nur einer (Full Frame) benutzt werden. Im Anhang findet man eine Tabelle mit den aktuellen Daten aller Modes. Hier wird im weiteren hauptsächlich auf das Prinzip der einzelnen Modes eingegangen.

### 4.4.1 Full Frame Mode

Der Full Frame Mode stellt Orts-, Zeit- und Energieinformationen zur Verfügung und ist für die meisten Beobachtungen sehr gut geeignet. Hier integriert man andauernd die von den auftreffenden Photonen generierte Ladung. Während der Integration werden alle CCDs nacheinander ausgelesen. Beim vollständigen Array von zwölf CCDs erhält man so eine



Zykluszeit von 73,4 ms. Der Full Frame Mode wird bei XMM voraussichtlich zu etwa 90%, bei ABRIXAS zu 100% eingesetzt werden und fungiert folglich als Standardmode.

Abbildung 4-11: Schematische Darstellung des Full Frame Modes

Einziges Problem stellt im Full Frame Mode bei der Beobachtung von Quellen mit hoher Rate die Integrationszeit dar. Wenn innerhalb einer Integrationszeit mehrere Photonen in ein Pixel fallen, kann das CCD diese nicht voneinander trennen und registriert sie als ein einziges Photon mit höherer Energie. Diesen Effekt nennt man Pile-Up (siehe 4.5).

Um den Pile-Up-Effekt zu reduzieren, kann man zu folgenden Modi übergehen:

### 4.4.2 Window Mode

Soll die Integrationszeit verkürzt werden, kann auf dem CCD-Array ein Fenster definiert werden. Danach werden nur noch die Pixel dieses Fensters ausgelesen. Alle anderen Pixel werden zur Anode geschoben und dort gelöscht. Da diese Pixel nur Zeit zum Schieben benötigen, nicht aber Zeit zum Auslesen verbrauchen, verkürzt sich die insgesamt zum Auslesen benötigte Zeit und somit auch die Integrationszeit. Orts-, Zeit- und Energieinformationen bleiben weiterhin erhalten.

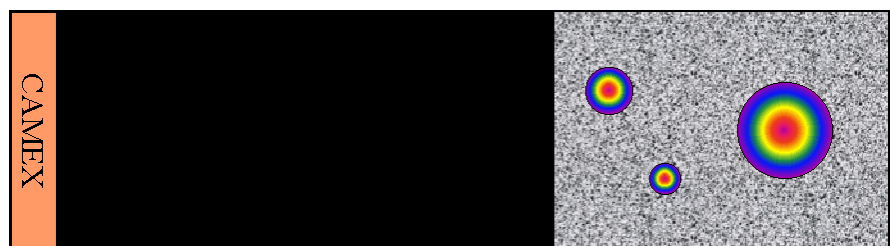


Abbildung 4-12: Schematische Darstellung des Window Modes

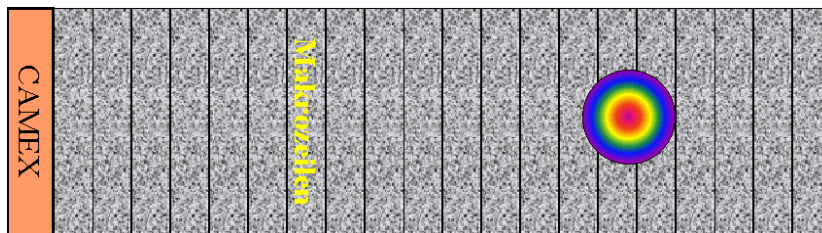


Durch den Window Mode werden insbesondere die Out of Time Events (siehe 4.5.1.1) reduziert. Hauptsächlich sollen im Window Mode ausgedehnte Quellen beobachtet werden, für die gerade oben erläuterte Reduktion wichtig ist.

### 4.4.3 Timing Mode

Will man zur Beobachtung sehr heller Quellen oder Quellen mit zeitlich sehr schnell wechselnder Intensität übergehen, benutzt man den Timing Mode.

Hier werden jeweils zehn Zeilen zur Ausleseanode geschoben und dort aufintegriert. Diese zehn Zeilen bezeichnet man als Makrozeile. Die Makrozeile wird ausgelesen und verschafft

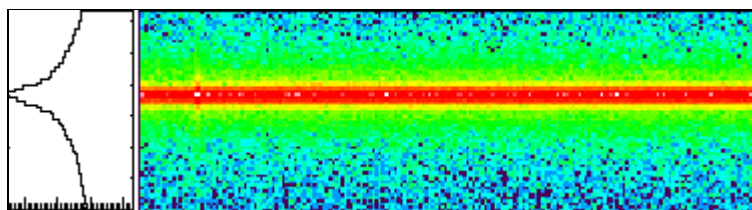


**Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Timing Mode**

einen Zeitvorteil: Die Zeit zum Auslesen von zehn Zeilen wäre nämlich fast 10 mal größer als die Zeit zum Auslesen der Makrozeile, da die Auslesezeit unabhängig von der auszulesenden Ladungsmenge ist. Dieser Prozeß (zehn Zeilen zur Makrozeile zusammenschieben und dann auslesen) läuft kontinuierlich ab. Man

erreicht eine Zeitauflösung von 30  $\mu$ s. Die bessere Zeitauflösung wirkt sich jedoch ungünstig auf die Ortsauflösung aus, da aufgrund des kontinuierlichen Schiebens die Ortsinformation in einer Dimension verloren geht.

Abbildung 4-13 zeigt die schematische Funktionsweise des Timing Modes und Abbildung 4-14 ein im Timing Mode entstandenes Bild einer Punktquelle.



**Abbildung 4-14: Bild einer Punktquelle im Timing Mode, visualisiert mit "on" (siehe auch S.48)**

Der Timing Mode wird hauptsächlich zur Beobachtung von sehr hellen Quellen eingesetzt werden, die schon im Full Frame Mode ortsauflöst detektiert wurden.

Der Timing wie auch der nachfolgende Burst Mode werden aufgrund ihrer guten Zeitauflösung auch als die „schnellen Modes“ bezeichnet.

#### 4.4.4 Burst Mode

Um noch hellere Quellen beobachten zu können, wird im Burst Mode auf die kontinuierliche Beobachtung verzichtet. Außerdem wird die Zeitauflösung „auf die Spitze getrieben“. Man platziert die zu beobachtende Quelle in den höchsten Zeilen des CCDs und läßt dann folgende Prozedur ablaufen:

200 Zeilen werden zur Anode geschoben und dort gelöscht. Während dieses Schiebens wird die Quelle auf 200 Zeilen abgebildet. Nun liest man 180 dieser Zeilen aus. Die übrigen 20

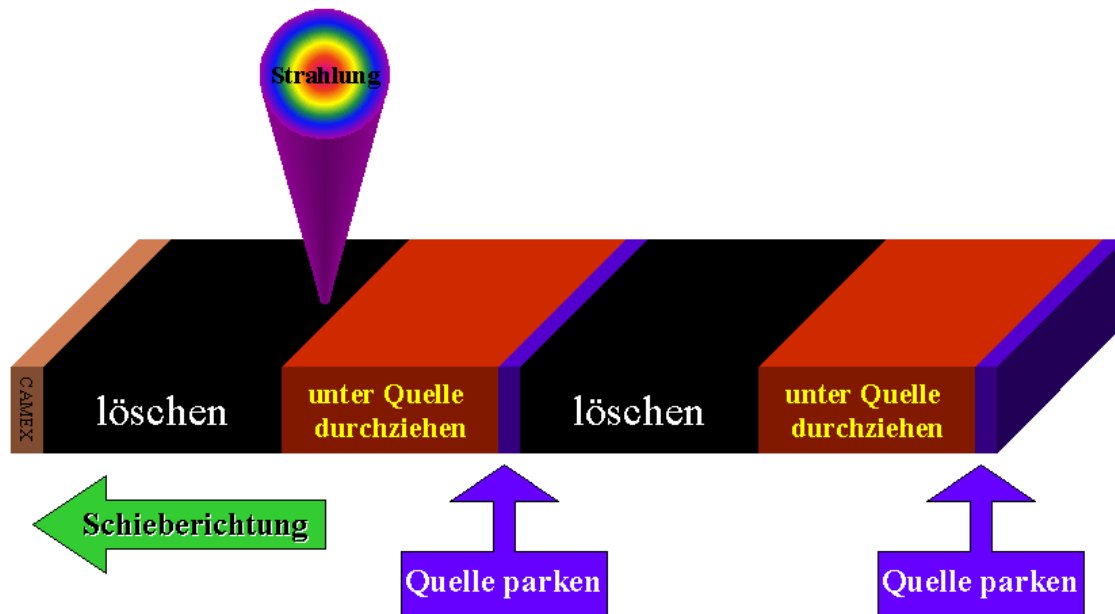


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung des Burst Modes

werden wieder gelöscht, damit die während des anfänglichen Auslesens auf die hinteren 20 Zeilen aufgetroffenen Photonen, die ja nicht mehr zum vorherigen Belichtungszyklus gehören, die Gesamtinformation nicht verfälschen. Man erreicht so eine Zeitauflösung von ca. 5  $\mu$ s, verliert jedoch auch wieder die Ortsinformation in Schieberichtung. Außerdem reduziert sich die effektive Beobachtungszeit aufgrund dieser Auslesetechnik auf 3,3%. Deshalb ist es vernünftig, den Burst Mode nur für wirklich sehr helle Quellen einzusetzen. Abbildung 4-15 soll auch diesen Mode schematisch veranschaulichen.

#### 4.5 Spezielle Effekte bei Photoneneinfall, Ladungstransport und Auslesen

Nur kurz soll jetzt auf die wesentlichen Effekte eingegangen werden, die beim Einsatz des pn-CCDs auftreten. Es ist wichtig, insbesondere die Auswirkungen dieser Effekte zu betrachten, denn sie verfälschen die Ergebnisse der gewonnenen Informationen erheblich und müssen deshalb korrigiert werden.

### 4.5.1 Beim Photoneneinfall wirksame Effekte

Es wird im folgenden von Events gesprochen. Unter einem Event versteht man ein detektiertes Ereignis, hervorgerufen durch den Einfall eines Photons auf das CCD.

#### 4.5.1.1 Out Of Time Events

Man erinnere sich an den Full Frame Mode. Zuerst wird für eine gewisse Zeit das CCD belichtet, danach ausgelesen. Dafür muß man die generierten Ladungen über das CCD hinwegschieben. Da für die kurze Zeit des Auslesens keine Verschußklappe über das Teleskop oder den Detektor gefahren werden kann, treffen also weiterhin Photonen auf das CCD auf. Dies führt z. B. dazu, daß ein Photon, das normalerweise in Zeile 100 fallen würde, nun in die eben gerade vorbeigeschobene Zeile 150 fällt. Das heißt, daß die Zeile 150 nun ein Event enthält, das aus einer anderen Richtung kam als die anderen in Zeile 150 befindlichen Events.

#### Ähnliches Beispiel:

Man stelle sich einen Zug mit 200 Waggons vor, der 10 Minuten aus 200 verschiedenen Wasserhähnen, die sich über den Waggons befinden und voneinander verschiedene, aber konstante Wassermengen abgeben, gefüllt wird. Man könnte die Wassermenge, die pro Minute aus einem Hahn läuft, einfach ermitteln, indem man nach den 10 Minuten die Wassermenge eines jeden Waggons misst und durch 10 Minuten teilt. Fährt der Zug allerdings schon in der neunten Minute ab, und die Hähne bleiben alle geöffnet, so fließt noch eine unbestimmte Menge Wasser in die Waggons. Diese Menge könnte man von der in den ersten neun Minuten eingeflossenen Menge nicht mehr unterscheiden. Die exakte Angabe der Wassermenge, die pro Minute aus einem der Hähne fließt, wird nun unmöglich.

Die Out Of Time Events tragen insbesondere zum erhöhten Hintergrund entlang der Schieberichtung bei. Des weiteren erschweren sie die genaue Ortsbestimmung der eingetroffenen Photonen. Dies ist für Punktquellen unproblematisch, da der Prozentsatz der Out Of Time Events sehr klein gegenüber dem der normal integrierten Events ist. Bei ausgedehnten Quellen kann sich der Effekt jedoch störend auswirken, da Out Of Time Events einzeln unkorrigierbar sind.

#### 4.5.1.2 Partial Events

Photonen mit Energien  $< 100$  eV werden mit hoher Wahrscheinlichkeit schon in der obersten p+-Schicht (Totschicht) absorbiert und können folglich nicht detektiert werden. Steigt die Photonen-Energie, so gelangen die Photonen durch die Totschicht hindurch, werden aber unmittelbar danach absorbiert. Die von ihnen deponierte Ladung wird zum Teil von der p<sup>+</sup>-Anode abgesaugt und kann nicht mehr vom CCD zur Ausleseanode transportiert werden.

Wenn die anfänglich von einem Photon erzeugte Ladungsmenge nur teilweise registriert werden kann, spricht man von einem Partial Event.

Dieser sogenannte Partial-Event-Effekt wirkt sich insbesondere als scheinbar schwächere Verstärkung bei niederen Energien aus: Die Peaklage eines Photons mit einer Energie unterhalb von ca. 1,8 keV wird nichtlinear zu kleineren Peaklagen verschoben. Dies suggeriert eine schwächere Verstärkung des Detektors.

#### 4.5.1.3 Split Events

Als Split Event bezeichnet man ein Photon, dessen erzeugte Ladungswolke sich nicht nur auf ein Pixel verteilt, sondern seine Energie an mehrere Pixel abgibt. Je nachdem wo es zwischen angrenzenden Pixeln auftritt, entstehen Double- Trippel- oder Quadrupel-Events. 93% der gesamten Splits sind Doubles. Sie führen bei einer scharf eingestrahlten Energie  $E_0$  zu einer zu  $E_0/2$  symmetrischen Spektralverteilung. Dieser Effekt wird auch, wie in Abbildung 4-16 ersichtlich, als „Badewanneneffekt“ bezeichnet. Ein Photon der Energie  $E_0$  wird also als je ein Event der Energie  $E_0 - \Delta E$  und ein Event der Energie  $\Delta E$  detektiert.

Bei der Korrektur dieses Effekts ist man darauf angewiesen, nachträglich die niederenergetischen Teile  $\Delta E$  wiederzufinden und darf deshalb die untere Energieschranke zur Ereignisfilterung nicht zu hoch ansetzen. Die niederenergetischen Anteile  $\Delta E$  würden sonst verloren gehen und die hochenergetischen Anteile  $E_0 - \Delta E$  als Single-Events interpretiert werden. Dies würde das Spektrum erstens verbreitern und zweitens zu kleineren Energien hin verschieben.

Die Split-Event-Korrektur wird mit Hilfe des von Edgar Bihler geschriebenen „flag“-Programms vorgenommen und kann bei tieferem Interesse in der Diplomarbeit von Edgar Bihler <sup>7</sup> nachgelesen werden.

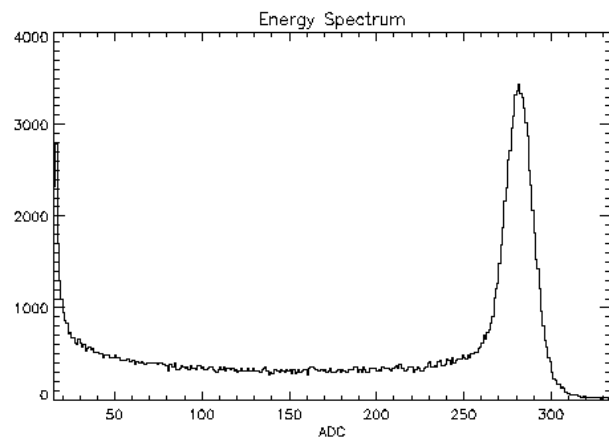


Abbildung 4-16: Spektrum einer Al-K-Linie ohne Split-Event-Korrektur

#### 4.5.1.4 Pile-Ups

Treffen innerhalb eines Belichtungszyklus zwei Photonen in ein Pixel, so werden sie als Ereignis mit der Energie der Summe der beiden Photonen detektiert. Man bezeichnet dies als „Pile-Up“. Bestrahlt man mit monoenergetischen Photonen, so äußern sich die „Pile-Ups“ als zusätzliche Linien bei kleinen Vielfachen der eingestrahlten Energie.

### 4.5.2 Trapping Effekte

Grundbaustoff des pn-CCDs ist Silizium. Gitterfehler im Silizium mit einem Energieniveau in der Bandlücke können als Störstellen, sogenannte Traps, fungieren. Sie fangen Elektronen bzw. Löcher ein und geben sie nach einer gewissen Zeit wieder ins Leitungs- bzw. Valenzband ab. Ist die Zeit zur Reemission eines eingefangenen Elektrons oder Lochs größer als die Zeit, die die Ladung in einem Pixel verweilt, so erreicht die durch ein Trap aufgehaltene Ladung die Ausleseanode später als die nicht eingefangenen Ladungsträger. Dies führt dazu, daß das an der Anode ankommende Signal bei einer geringeren Energie detektiert wird, als es in Wirklichkeit besitzt.

#### 4.5.2.1 Charge Transfer Efficiency

Eben beschriebenes Phänomen kann mit Hilfe der Charge Transfer Efficiency (CTE) beschrieben werden. Sie gibt an, wie gut durch Photoneneinfall generierte Ladung geschoben werden kann.

Es gilt:

$$E = E_0 \cdot CTE^{\text{Zeile}}$$

Gleichung 4-1

wobei **E** = gemessene Energie

**E<sub>0</sub>** = Energie, die ohne Ladungsverlust detektiert werden würde.

**Zeile** gibt an, wie oft die generierte Ladung bis zur Ausleseanode geschoben wurde.

Da  $E \leq E_0$  gilt immer  $CTE \leq 1$ .

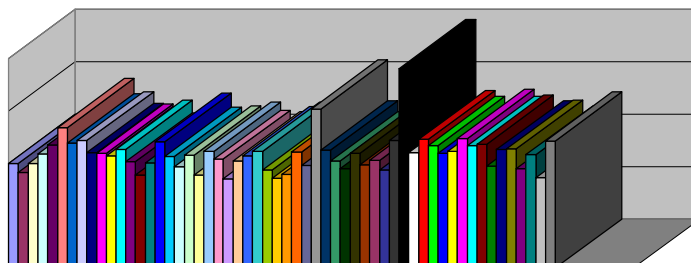
Eine CTE von 1 würde bedeuten, daß beim Schieben keine Ladung verloren geht.

Die CTE selbst hängt von vielen Faktoren ab, von denen die wichtigsten der Betriebsmodus des CCDs, Temperatur, Photonenenergie, Photonenrate, Strahlungsschäden und Event-Vorgeschichte in der Spalte sind. Genauere Untersuchungen dieser Art an einem pn-CCD wurden von Norbert Krause und Norbert Meidinger am MPE durchgeführt <sup>8</sup>.

Es wird sich im weiteren zeigen, inwieweit die CTE von den einzelnen Faktoren abhängt und wie diese Relationen in die Eichung des CCDs eingehen.

#### 4.5.3 Unterschiedliche Verstärkung der einzelnen Kanäle

Ist eine von Photonen generierte Ladungsmenge an der Ausleseanode angekommen, so muß sie vom in 4.3.4 besprochenen CAMEX verstärkt und ausgegeben werden. Die 64 Kanäle des CAMEX besitzen eine bis zu 1% abweichende Verstärkung <sup>9</sup>. Auch haben die 64 JFETs auf dem CCD verschiedene Eigenschaften. Ohne die Korrektur dieses Effekts würde ein Linienspektrum verbreitert werden. Abbildung 4-17 zeigt die unterschiedliche Verstärkung einer eingestrahlten Fe-K-Linie. Man bezeichnet die unterschiedliche Verstärkung der einzelnen Kanäle als „Gain“.





## 4.6 Korrekturen

Von besondere Wichtigkeit für diese Arbeit sind die folgenden Effekte:

- **Partial-Event-Effekt**
- **CTE**
- **Unterschiedliche Verstärkung der Kanäle**

Diese drei Effekte sollen in Abhängigkeit verschiedener Parameter quantifiziert und soweit wie möglich korrigiert werden.

### 4.6.1 Gain-Korrektur

Um die unterschiedliche Verstärkung der einzelnen Kanäle auszugleichen, kann man wie folgt vorgehen: Man bestrahlt homogen mit gleicher Energie, betrachtet dann das verstärkte Signal jedes einzelnen Kanals und bildet den Mittelwert aus allen Kanälen. Erstellt man nun das Verhältnis aus Mittelwert und Kanaleinzelwert, so erhält man einen Korrekturfaktor für jede Spalte. Dieser Faktor erlaubt es, zu stark verstärkende Spalten etwas zu dämpfen und zu schwach verstärkende Spalten etwas anzuheben. Es genügt, den Korrekturfaktor für jeden Kanal einmal zu bestimmen, wenn sich die äußeren, auf das CCD einwirkenden Faktoren nicht ändern. Die 64 Korrekturfaktoren können in der sogenannten „Gain-Tabelle“ gespeichert werden, und jedes weitere Spektrum kann damit „Gain-korrigiert“ werden.

Ist ein Spektrum „Gain-korrigiert“, kann aus der Kenntnis der Energie der eingestrahnten Photonen nun die Gesamtverstärkung – genannt **Amplification** – bestimmt werden. Sie gibt an, wieviel ADC (Analog Digital Counts) pro eingestrahlt eV der Detektor anzeigt.

Da man beim Kanaleinzelwert die Energie der Photonen einer gesamten Spalte benutzt, geht in die Gain natürlich auch die CTE mit ein. Wie diese zwei Effekte für die Eichung voneinander getrennt werden können, wird später noch genauer erläutert.

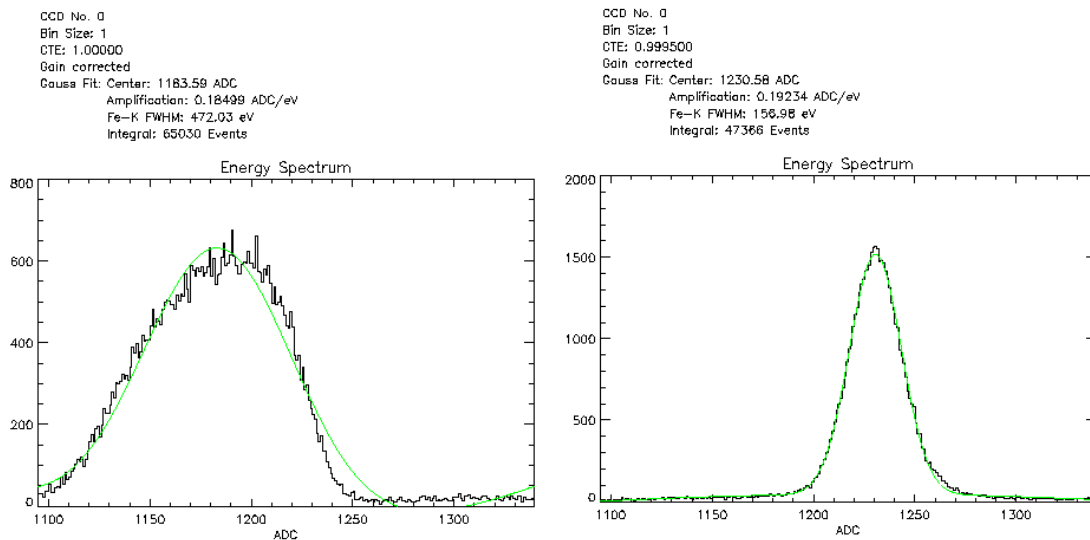
### 4.6.2 CTE-Korrektur

Ist die CTE erst einmal bekannt, kann durch einfache Umstellung von Gl. 4.1 nach

$$E_0 = E \cdot CTE^{-Zeile} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

die tatsächliche Energie des Photons aus der gemessenen Energie berechnet werden.

In Abbildung 4-18 wird deutlich, wie sich die CTE-Korrektur auswirkt.



**Abbildung 4-18: Fe-K-Spektrum ohne und mit CTE-Korrektur**

#### 4.6.3 Korrektur des Partial-Event-Effekts

Zur Zeit ist noch unklar, wie man den Partial-Event-Effekt endgültig korrigiert. Wahrscheinlich werden aus der Eichung resultierende und mit Modellrechnungen optimierte nichtlineare Faktoren dafür in die Detektor-Response-Matrix eingehen.

### 4.7 Faktoren für die Eichung des pn-CCDs

Um das Array der zwölf pn-CCDs eichen zu können, sollten folgende Aspekte behandelt werden:

Amplification und CTE sollen in Abhängigkeit der Temperatur des CCDs, der Energie und Rate der eingestrahnten Photonen sowie der Auswirkung des Partial-Event-Effekts (siehe 4.5.1.2) auf die Peaklagenverschiebung zu kleineren Energien quantifiziert werden.

Amplification und CTE sollen unabhängig voneinander beschrieben werden.

Weiterhin soll die Energie- und Zeitauflösung des CCDs in den schnellen Modes untersucht werden.

