

7. Ergebnisse und Deutung

Die folgenden Ergebnisse resultieren aus den an der PANTER-Testanlage und am LURE/IAS genommenen Messungen. Sofern es möglich ist, werden alle in 4.7 angesprochenen Faktoren behandelt. In einigen Bereichen konnte das pn-CCD nicht ausreichend kalibriert werden, da die zur Verfügung stehende Meßzeit nicht für alle Gesichtspunkte ausreichte. Manchmal mußten weniger wichtigere zugunsten von wichtigeren Gesichtspunkten zurückgestellt werden (siehe auch 8.1). In manchen Fällen konnte man deshalb nur sehr wenige Meßpunkte nehmen – zu wenige für eine brauchbare Eichung. Trotzdem zeigen diese Werte im allgemeinen Trends, die es rechtfertigen, weitere Messungen in eine bestimmte Richtung durchzuführen. Ebenso kann man aus besagten Trends Schlüsse über die Qualität der jeweiligen Eichmethode ziehen und sich so eine Strategie für weitere Eichungen erarbeiten.

Die hier vorliegenden Ergebnisse werden exemplarisch für das CCD 0 im Quadranten 0 angegeben (außer in 7.2.1.1). Die Auswertungen für andere CCDs laufen äquivalent ab. Die Peaklage wurde jeweils durch Best-Fits einer Gausverteilung bestimmt, wobei sich das Spektrum aus Single-Events zusammensetzte.

7.1 Vergleich der Gain von PANTER- und LURE/IAS-Messungen

Ursprünglich war geplant, die Messungen im PANTER bzw. im LURE/IAS unter gleichen CCD-Betriebsbedingungen durchzuführen. Leider mußte aufgrund eines Störfalls gegen Ende der PANTER-Messungen (siehe 8.2) die Rückkontaktspannung des CCDs geändert werden. Aus Zeitgründen konnten nicht alle zu dieser Zeit schon vorgenommenen Eichmessungen wiederholt werden.

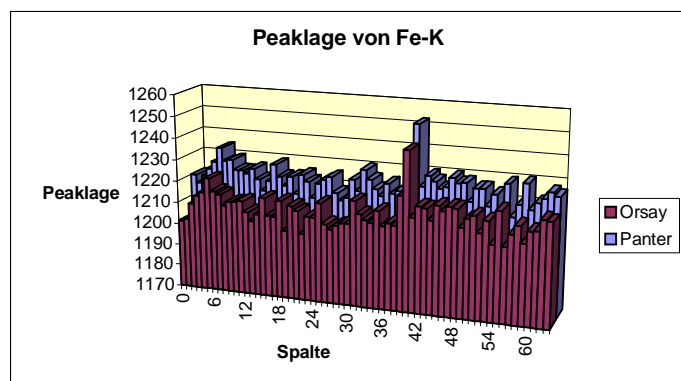


Abbildung 7-1: Gain vor und nach Umstellung der Rückkontaktspannung auf -180 V

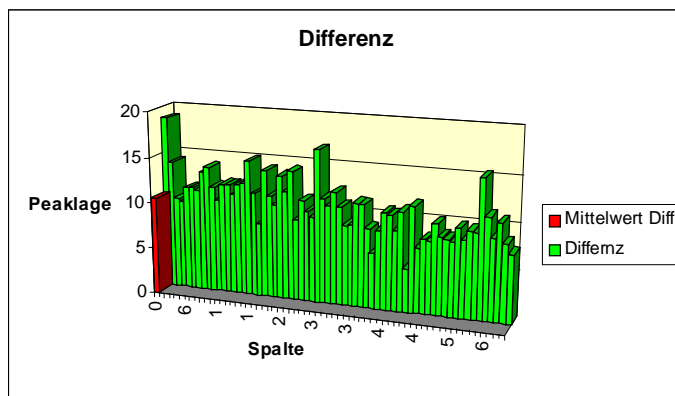


Abbildung 7-2: Differenz der Peaklage einer Fe-K-Linie vor und nach Umstellung der Rückkontaktspannung auf -180 V

Abbildung 7-1 zeigt die Gain einer Fe-K-Linie. Es handelt sich hierbei zum einen um eine Schlitzmessung im Full Frame Mode vor Änderung der Rückkontaktspannung an der PANTER-Anlage und zum anderen um eine Messung nach der Änderung in Orsay. Die Peaklage in den einzelnen Spalten wurde jeweils mit einer Genauigkeit von 0,3 ADC bestimmt. Es ergibt sich eine mittlere Differenz von

10,62 ADC nach der Umstellung, die jedoch nicht konstant über die Spalten ist, wie man in Abbildung 7-2 deutlich sieht. Dies entspricht einer Verschiebung der Peaklage von 0,87%. Man muß also davon ausgehen, daß sich die verschiedenen Meßreihen von PANTER und LURE/IAS unterscheiden. Dieser Vergleich konnte mit Schlitzmessungen im Full Frame Mode nur bei Fe-K geführt werden. Flat Field-Messungen im Full Frame Mode mit der Fe^{55} -Eichquelle vor und nach der Änderung der Rückkontaktspannung zeigten ebenfalls eine Differenz in der Peaklage, die sogar im Mittel 23 ADC betrug. Da die Verstärkung von Mode zu Mode unterschiedlich ist und in Timing und Burst Mode nicht genügend Messungen gemacht wurden, die es erlauben, eine Transformation zwischen der Verstärkung vor und nach der Rückkontaktspannungs-Änderung zu erstellen, können die Timing und Burst Mode-Messungen von Neuried und Orsay nicht für dieselbe Auswertung genutzt werden.

7.2 Amplification

Im folgenden soll die Amplification in Abhängigkeit von Temperatur, Rate und Photonen-Energie untersucht werden. Die Temperaturabhängigkeit wurde nur im Full Frame Mode untersucht.

7.2.1 Temperaturabhängigkeit der Amplification

7.2.1.1 Full Frame Mode

Es wurde mit Hilfe von Schlitzmessungen in direkter CAMEX-Nähe die Amplification der vier zentralen CCDs bei fünf Temperaturen bestimmt. Dabei wurde mit Fe-K-Photonen einer Energie von 6404 eV bestrahlt.

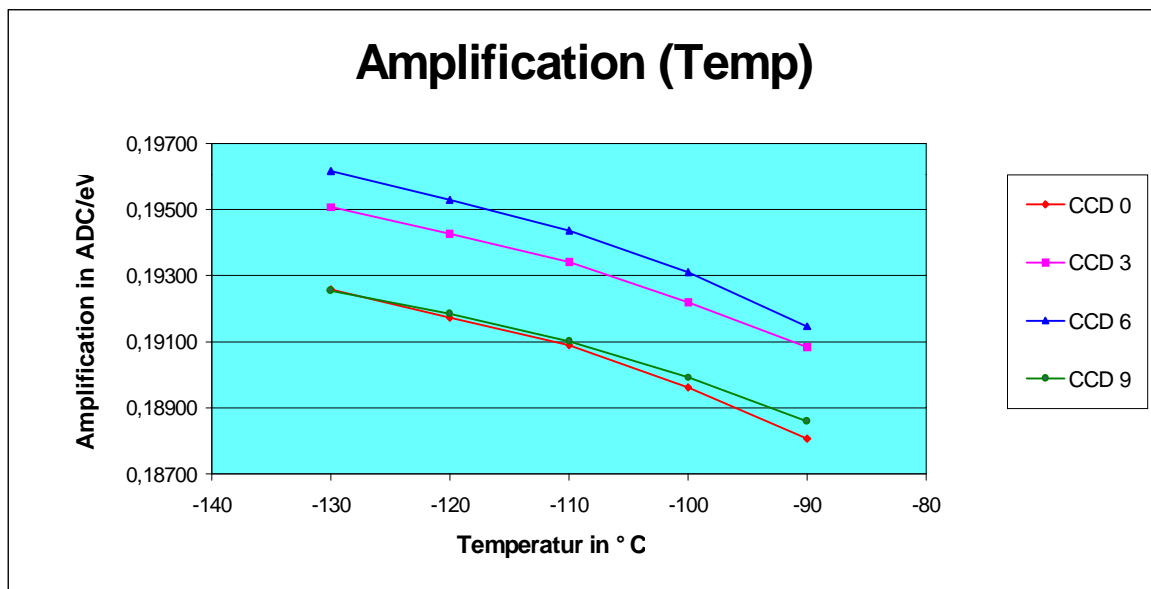


Abbildung 7-3: Amplification in Abhängigkeit der Temperatur

Es resultiert, daß sich alle vier zentralen CCDs tendenziell gleich verhalten und mit fallender Temperatur eine höhere Verstärkung zeigen. Die Fehlerbalken in Abbildung 7-3 ergeben sich aus der Fit-Ungenauigkeit des Gausfits von „flag“ bzw. „idl“ mit konservativ geschätzten 0,3 ADC im Fit an die Fe-K-Linie zu einer Standardabweichung von 0,00005 ADC/eV. Damit

haben sie in Abbildung 7-3 die Größe der Datenpunktmarkierungen. Dies ergibt sich durch die sehr gute Statistik der Messungen mit ca. 60.000 Events in der Linie der ersten 5 Zeilen. In Abbildung 7-4 wurde die Amplification jedes CCDs bei -130 °C auf 1 normiert um die Gradienten der Temperaturabhängigkeit der einzelnen CCDs darzustellen.

Die Temperaturabhängigkeit der Verstärkung hat ihren Ursprung in der Temperaturabhängigkeit des CAMEX bzw. der On-Chip-Verstärkung. Ob nun letztere oder der CAMEX hauptverantwortlich für diesen Effekt sind, läßt sich nicht klären, da beim vollständig integrierten CCD CAMEX- und On-Chip-Verstärkung nicht mehr zu trennen sind.

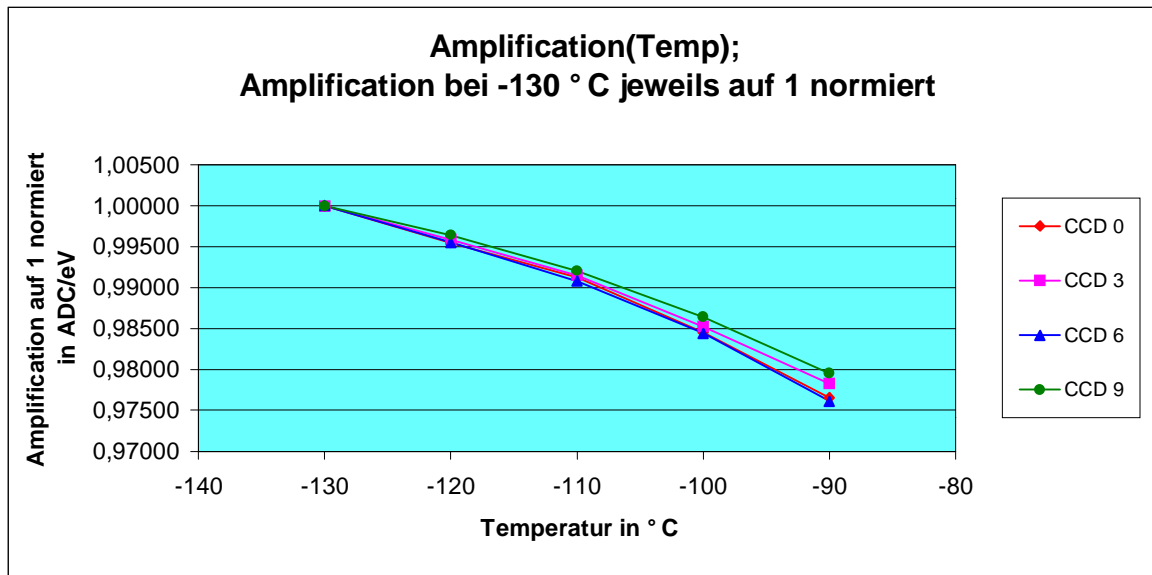


Abbildung 7-4: Amplification in Abhängigkeit der Temperatur bei -130 °C auf 1 normiert

7.2.2 Ratenabhängigkeit der Gain und Amplification

Während der Orsay-Kalibration wurde bei einer Temperatur vom -110 °C die Ratenabhängigkeit aus Schlitzmessungen am CAMEX bei der Energie 9886 eV der Ge-K-Linie bestimmt. Man bestrahlte dabei jeweils die ersten 5 Zeilen am CAMEX. Nur im Burst Mode mußte aufgrund seiner Mode-Eigenheiten in den Zeilen 180 bis 199 bestrahlt werden. Das heißt: Im Burst Mode konnten Gain und Amplification nicht von der CTE getrennt werden.

Die Rate gibt die Events einer Spalte in der jeweiligen Linie an. Wenn von der „Mittleren Rate“ gesprochen wird, ist damit das Mittel der Events aller Spalten in der jeweiligen Linie gemeint.

7.2.2.1 Full Frame Mode

Die folgenden Untersuchungen wurden, wie in 6.1 erläutert, ohne CTE-Korrektur durchgeführt. Mit „flag“ wurde die Peaklage in jeder Spalte separat bestimmt und dann zur ursprünglich eingestrahlenen Energie ins Verhältnis gesetzt. Die Fehlerbalken

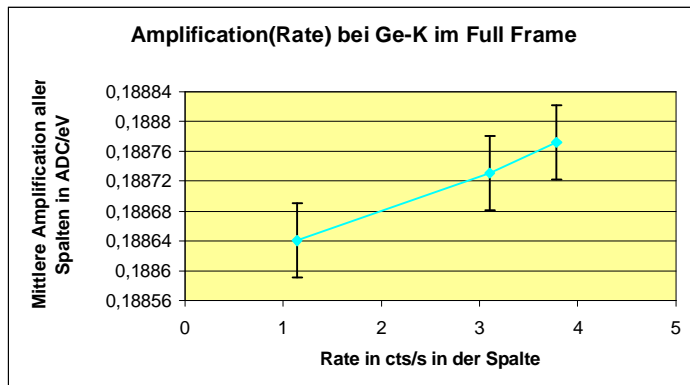


Abbildung 7-5: Amplification in Abhängigkeit der Rate einer eingestrahlenen Ge-K-Linie

Erhöhung der Rate um den Faktor 3,3 die Verstärkung um 0,7 Promille vergrößert. Dieser Anstieg hängt jedoch höchstwahrscheinlich mit der sich bemerkbar machenden CTE bei höheren Rate zusammen. Das heißt, daß bei kleineren Raten auch in den ersten fünf Zeilen noch relativ viel Ladung verloren geht. Korrigiert man die in Abbildung 7-5 gezeigte Abhängigkeit mit einer im Full Frame Mode aus Flat Field-Bestrahlungen erhaltenen CTE, so zeigt sich, daß eine Ratenabhängigkeit nun im Bereich der Fehlerbalken liegt. Man kann also im Full Frame Mode von einer linearen Verstärkung ausgehen (Abbildung 7-7).

Es zeigt sich, daß sich bei einer ursprünglich eingestrahlenen Energie ins Verhältnis gesetzt. Die Fehlerbalken ergeben sich wiederum aus dem Fitfehler. Der durch die Mittelung über alle Spalten gegebene systematische Fehler (siehe auch 4.5.3) wurde nicht angegeben, da er bei jeder Messung gleich ist. Abbildung 7-6 zeigt das Phänomen der Gain, das sich nun auch in bezug auf die Ratenabhängigkeit fortsetzt.

Es zeigt sich, daß sich bei einer

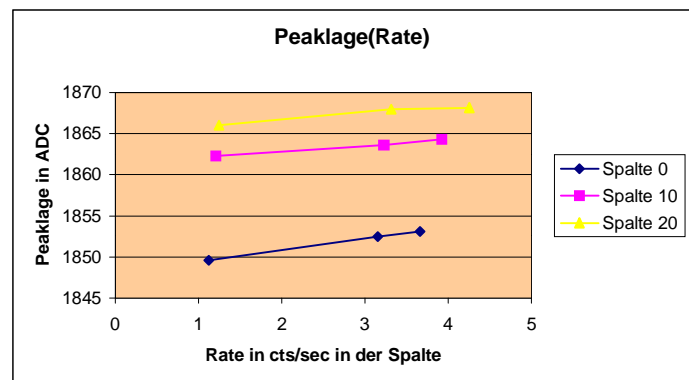


Abbildung 7-6: Unterschiedliche Verstärkung der einzelnen Kanäle in Abhängigkeit der Rate

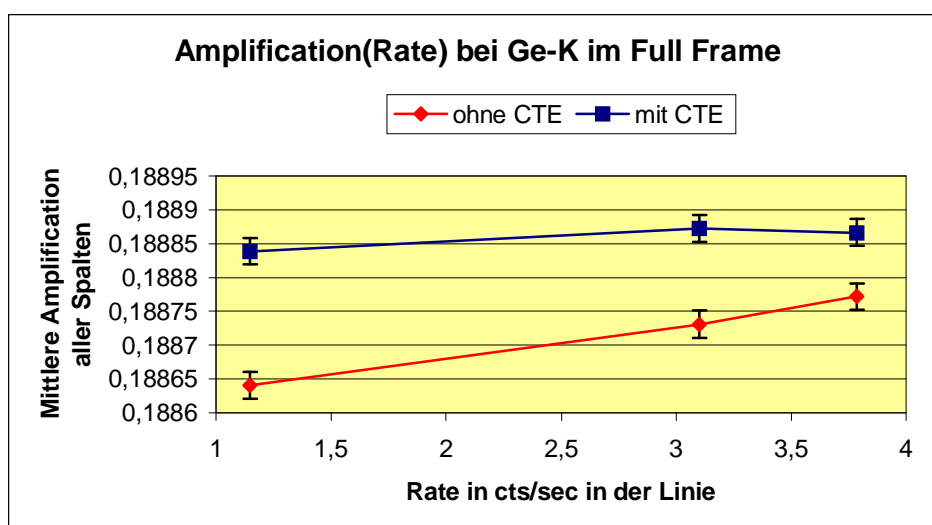
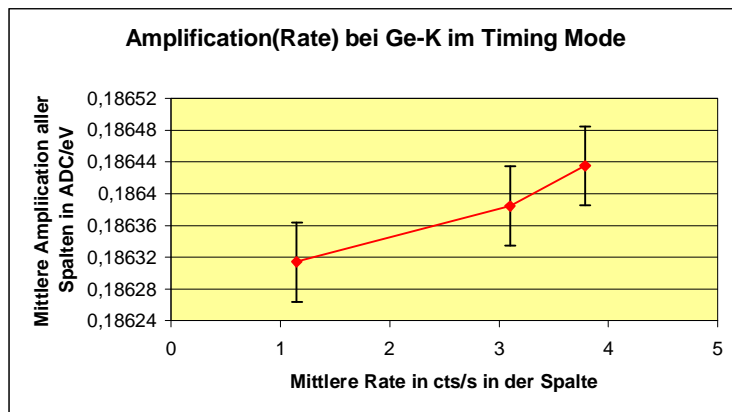


Abbildung 7-7: Vergleich der Ratenabhängigkeit der Amplifikation im Full Frame Mode mit und ohne CTE-Korrektur

7.2.2.2 Timing Mode

Im Timing Mode wurde unmittelbar nach den Messungen im Full Frame die gleiche Untersuchung durchgeführt. Hier ergibt sich folgende Abhängigkeit:



Wie im Full Frame vergrößert sich die Amplifikation auch im Timing Mode bei einer Ratenänderung vom Faktor 3,3 um 0,7 Promille. Allerdings ist die Amplifikation im Timing Mode durchschnittlich um 0,0023 ADC/eV schwächer als im Full Frame Mode, wie Abbildung 7-8 verdeutlicht. Dies entspricht bei Ge-K 23 ADC.

Abbildung 7-8: Amplification in Abhängigkeit der Rate einer eingestrahnten Ge-K-Linie im Timing Mode

Diese Differenz in der Verstärkung zieht sich durch alle Spalten hindurch. Um das zu verdeutlichen, wurden die gleichen drei Spalten einmal im Full Frame und ein anderes Mal im Timing Mode untersucht (siehe Abbildung 7-9). Es stellt sich heraus, daß die Amplifikation im Timing Mode in allen Spalten schwächer ist als im Full Frame Mode (siehe auch 7.2.4). Als Beispiel wurden in Abbildung 7-10 die Spalten 0, 10 und 20 herausgegriffen. Die Differenz in der Amplifikation zwischen Full Frame und Timing Mode schwankt bei diesen drei Spalten

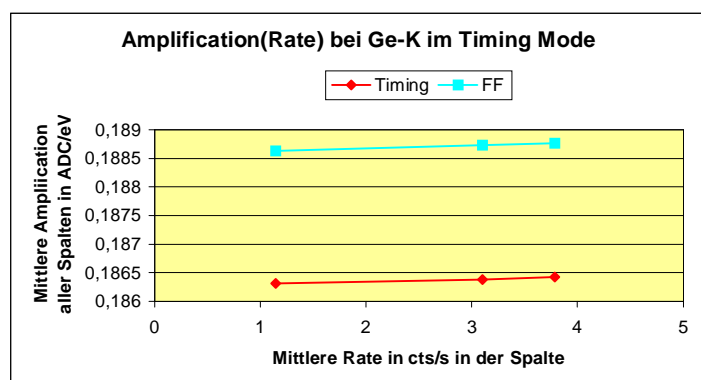


Abbildung 7-9: Vergleich der Amplifikation im Full Frame und Timing Mode

um ca. 1,3 %.

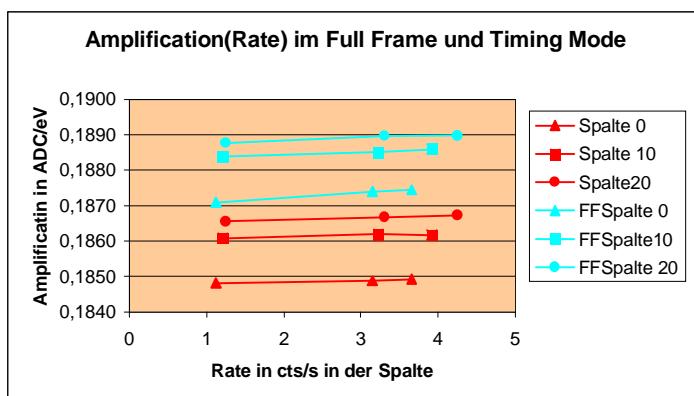


Abbildung 7-10: Differenz der Amplifikation zwischen Full Frame und Timing Mode bei verschiedenen Spalten und Raten

Im Timing Mode läßt sich die Ratenabhängigkeit nicht wie im Full Frame Mode durch die Annahme erklären, daß beim Übergang zu einer höheren Rate die CTE besser wird. Nimmt man eine solche Korrektur mit der in 7.3.2.1 bestimmten ratenabhängigen CTE des Timing Modes vor, so erkennt man, daß die Abhängigkeit der CTE des Timing Modes von der

Rate nicht stark genug ist um eine Amplification-Zunahme bei höheren Raten zu suggerieren (Abbildung 7-11). Folglich muß die Amplification des CCDs im Timing Mode ratenabhängig sein.

Eine Erklärung für dieses Phänomen wäre, daß sich der Arbeitspunkt des CAMEX aufgrund der durch die höhere Rate vergrößerten Ladungsmenge verschiebt und so die Verstärkung höher wird.

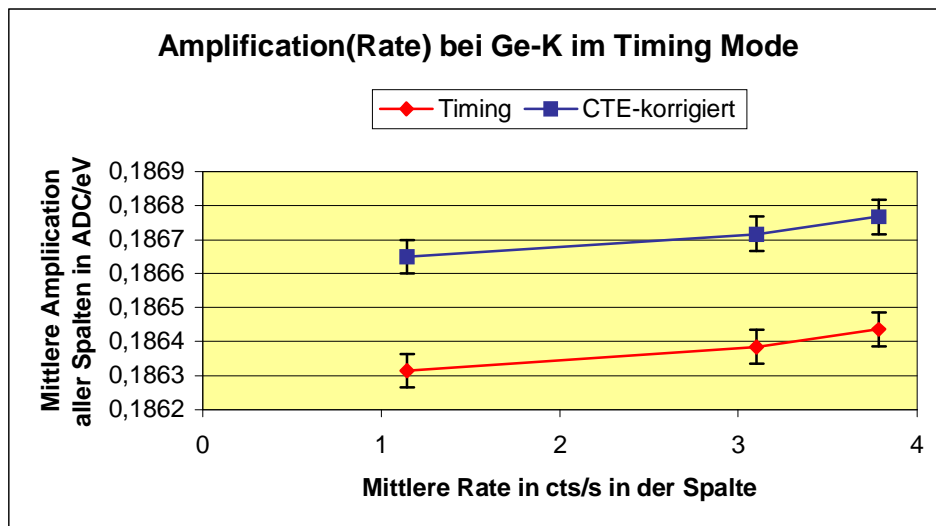


Abbildung 7-11: Vergleich der Ratenabhängigkeit der Amplification im Timing Mode mit und ohne CTE-Korrektur

7.2.2.3 Burst Mode

Im Burst Mode zeigen sich ähnliche Effekte, jedoch konnten hier aufgrund der beschränkten Meßzeit nur zwei Meßpunkte genommen werden. Der sich hier ergebende Trend geht jedoch mit den Ergebnissen aus Full Frame und Timing Mode einher.

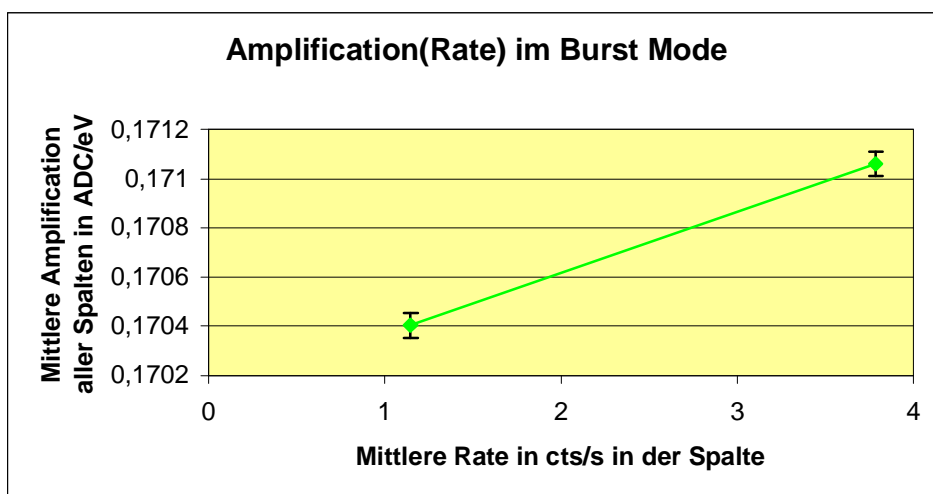


Abbildung 7-12: Trend der Amplification in Abhängigkeit der Rate im Burst Mode

7.2.3 Energieabhängigkeit der Gain und Amplification

Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe von Schlitzmessungen in den ersten 5 Zeilen des CCDs durchgeführt (siehe 6.1).

7.2.3.1 Full Frame Mode

Für den Full Frame Mode steht eine ausführliche Meßreihe zur Verfügung, die sich aus Röntgenröhren-, DCI-, und SACO-Messungen zusammensetzt.

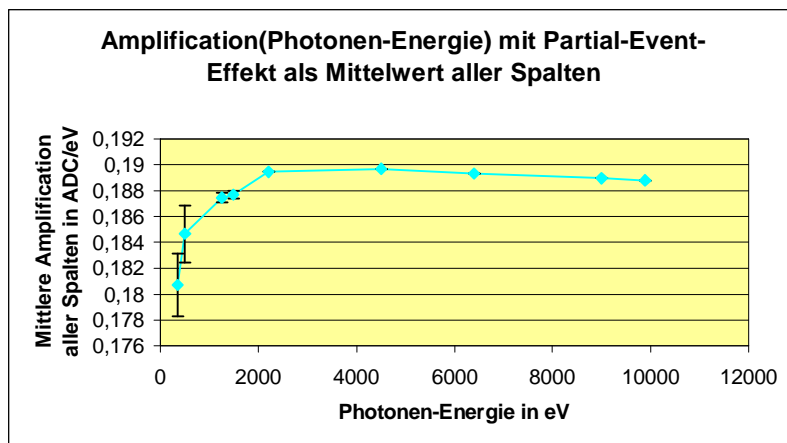


Abbildung 7-13: Amplification in Abhängigkeit der eingestrahlenen Photonen-Energie im Full Frame Mode unter Einwirkung des Partial-Event-Effekts

Deutlich zeigte sich bei dieser Untersuchung der Partial-Event-Effekt bei kleineren Energien. Dieser Effekt schwächt die Verstärkung ab, da von Photonen mit kleinen Energien nicht die gesamte Ladung detektiert wird (siehe 4.5.1.2). In Abbildung 7-13 ist das Ergebnis dieser Untersuchung im Full Frame Mode dargestellt. Die angegebenen Fehlerbalken ergeben sich durch Quadratische Subtraktion

von systematischem Fehler (aufgrund der Gain) und statistischem Fehler. Abbildung 7-13 zeigt auch, daß die Verstärkung bei höheren Energien wieder schwächer wird. Letzteres ist wahrscheinlich auf einen Sättigungseffekt der CAMEX-Verstärkung zurückzuführen.

Die gemessenen Werte wurden mit einer Modellrechnung verglichen, in die der Partial-Event-Effekt eingeht¹¹. Leider verfügen die gemessenen Werte und der durch das Modell erfaßte Energiebereich nur über drei gemeinsame Punkte (350 eV, 500 eV und 1254 eV), (Abbildung 7-14). Qualitativ gesehen stimmen Modell und Theorie überein, es wird jedoch nötig sein, weitere Messungen – speziell bei kleineren Energien – zu machen, um das Modell auch quantitativ anpassen zu können.

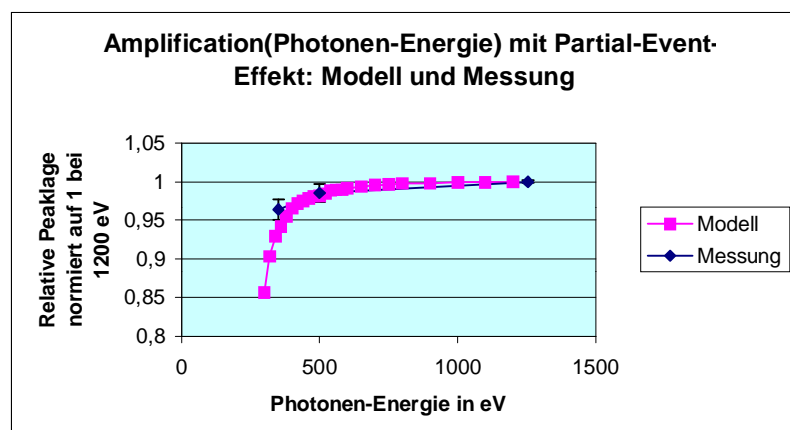


Abbildung 7-14: Vergleich eines Modells der Amplification unter Einbeziehung des Partial-Event-Effekts mit Orsay-Schlitzmessungen am CAMEX im Full Frame Mode

Die gesamte Analyse wurde für jede Spalte durchgeführt. Somit kann die Amplifikation jeder einzelnen Spalte konkret für die gemessenen Energien angegeben werden. Abbildung 7-15 zeigt dies für die Spalten von CCD 0 im Quadrant 0.

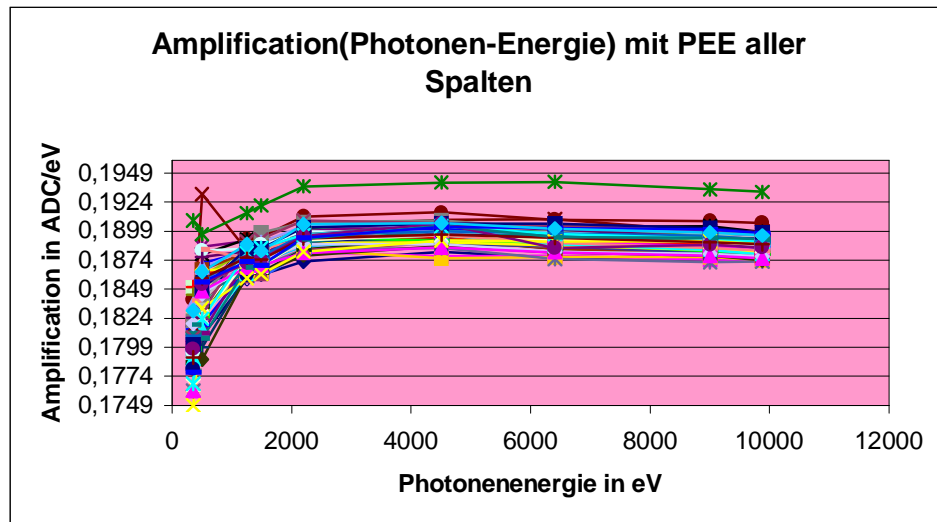


Abbildung 7-15: Amplifikation in Abhängigkeit der eingestrahlichten Photonen-Energie aller Spalten unter Einfluß des Partial-Event-Effekts

7.2.3.2 Timing Mode

Messungen zur Bestimmung der Energieabhängigkeit der Amplifikation wurden auch im Timing Mode durchgeführt. Allerdings mußte hier zugunsten von Full Frame-Messungen auf DCI- und SACO-Messungen verzichtet werden. Abbildung 7-16 zeigt die Amplifikation im

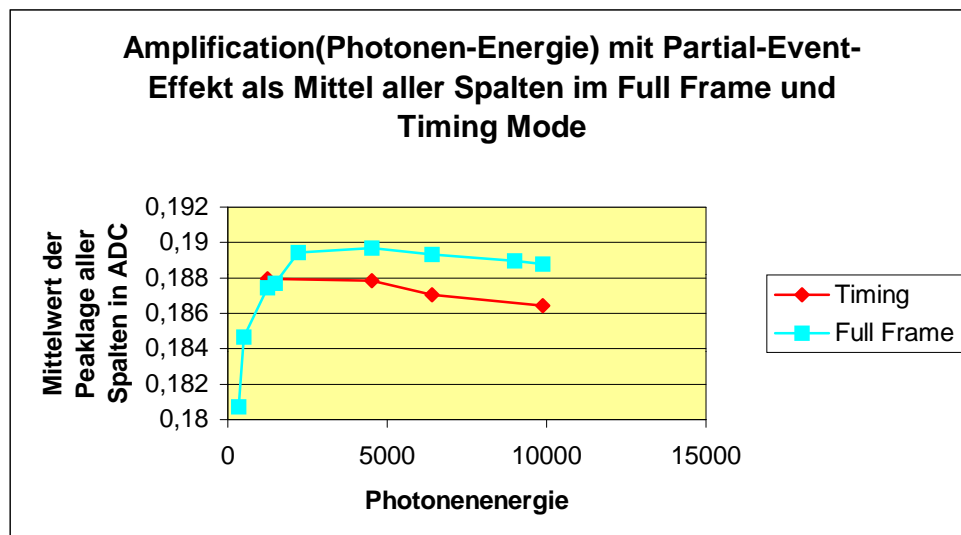


Abbildung 7-16: Amplifikation in Full Frame und Timing Mode in Abhängigkeit der eingestrahlichten Photonen-Energie unter Einfluß des Partial-Event-Effekts

Full Frame und Timing Mode. Auch hier ist wieder die grundsätzliche Differenz zwischen Full Frame und Timing Mode in der Verstärkung zu sehen.

Ebenso wie im Full Frame Mode erkennt man im Timing Mode die gleiche Schwächung der Amplification bei höheren Energien. Das wiederum ist höchstwahrscheinlich auf einen Sättigungseffekt in der Verstärkung des CAMEX zurückzuführen.

7.2.3.3 Burst Mode

Im Burst Mode wurden nur zwei Energien gemessen – zu wenig um eine Aussage über die Energieabhängigkeit bzw. die Einwirkung des Partial-Event-Effekts auf Gain und Amplification zuzulassen.

7.3 Vergleich der Gain in verschiedenen Modes

Des weiteren wurde die Verstärkung der Ge-K-Linie aller Spalten in verschiedenen Modes verglichen. In Abbildung 7-17 erkennt man, daß die CCD-Kamera in den jeweiligen Modes unterschiedlich verstärkt. Diese Unterschiede sollen im folgenden erläutert werden.

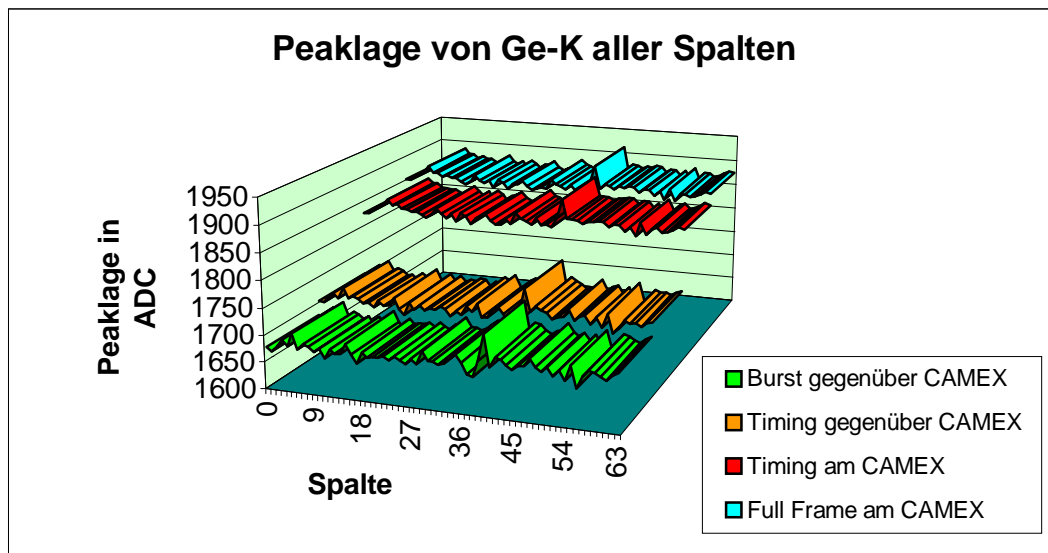


Abbildung 7-17: Gain in verschiedenen Modes

7.3.1 Differenz zwischen Full Frame Mode und Timing Mode - jeweils am CAMEX bestrahlt

Der Unterschied zwischen der Messung am CAMEX im Full Frame und der im Timing Mode läßt die Schlußfolgerung zu, daß beim andauernden Schieben im Timing Mode mehr Ladung verloren geht als im Full Frame Mode, in dem deutlich länger integriert als geschoben wird. Dieser Ladungsverlust könnte dadurch entstehen, daß der zeitliche Ablauf der Signalverarbeitung im CAMEX in Full Frame und Timing Mode unterschiedlich ist.

7.3.2 Differenz zwischen Timing Mode am CAMEX bestrahlt und Timing Mode gegenüber des CAMEX bestrahlt

Die unterschiedliche Verstärkung der beiden Messungen im Timing Mode – einmal am CAMEX, einmal gegenüber des CAMEX – entsteht durch den Ladungsverlust beim Schieben im Timing Mode. Man erkennt, daß beim Schieben von Ladung über das gesamte CCD hier ca. 8% der generierten Ladung verloren gehen.

7.3.3 Differenz zwischen Full Frame Mode am CAMEX bestrahlt und Burst Mode gegenüber des CAMEX bestrahlt

Die weitaus schwächere Verstärkung im Burst Mode läßt sich wie folgt erklären: Drei Effekte beeinflussen die durch den Photoneineinfall generierte Ladung:

1. Ein Teil des Ladungsverlustes kann mit dem Störstellenmodell der Traps erklärt werden. Man geht davon aus, daß die Traps im gesamten Silizium gleich verteilt sind und daß eine Ladungswolke die Störstellen eines Pixels absättigt, wenn sie im Pixel gehalten wird. Dem ausgelesenen Event fehlt also in seiner Energie ein gewisser Teil ΔE_1 . Wird die gleiche Ladungswolke über viele Pixel bewegt, so kann sie wesentlich mehr Störstellen absättigen, beim Auslesen fehlt nun die Energie $n \cdot \Delta E_1$, wobei n das Verhältnis der beim Schiebevorgang abgesättigten Störstellen zu der Anzahl der abgesättigten Störstellen in einem Pixel ohne Schieben ist.
2. Im Burst Mode wird mit der Dauer des Schiebens die für den korrekten Ladungstransport verantwortliche Amplitude der Phi-Pulse kleiner. So ist es eventuell nicht mehr möglich, die gesamte deponierte Ladung zu transportieren. Dies führt beim Auslesen zu einem weiteren Energieverlust ΔE_2 .
3. Bei der Schlitzmessung im Full Frame befindet sich die deponierte Ladung in den ersten fünf Zeilen, im Burst Mode hingegen verteilt sie sich über 180 Zeilen. Folglich wirkt sich im Burst Mode die CTE des normalen Schiebens beim Auslesen auch noch aus und verringert die detektierte Energie um ΔE_3 .

Der Unterschied in der detektierten Energie zwischen Full Frame und Burst Mode setzt sich also zusammen aus:

$$\Delta E_{Burst} = n \cdot \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 \quad \text{Gleichung 7-1}$$

7.3.4 Allgemeine Zusammensetzung des Verlustes der detektierten Energie

Aus den Punkten 7.3.1 bis 7.3.3 läßt sich nun eine allgemeine Verlustgleichung ableiten, die die einzelnen Ladungsverluste im Vergleich zum Full Frame Mode beinhaltet. Es gilt:

$$\begin{aligned} \Delta E_{ges.} = & \Delta E_{\text{Schieben beim Auslesen}} \\ & + \Delta E_{\text{schnelles Schieben}} \\ & + \Delta E_{\text{Base-Line-Erhöhung}} \\ & + \Delta E_{\text{Phi-Pulse}} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 7-2}$$

7.4 CTE

Die CTE wurde mit Hilfe der in 6.2 angegebenen Methoden untersucht.

Allgemein gilt Gleichung 6-2:

$$CTE = z_{\text{ile}} \sqrt{\frac{E}{E_0}}$$

Bei der Berechnung der CTE entsteht folgender Fehler nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:

Der Gauss-Fit zur Bestimmung der E - bzw E_0 -Energien besitzt die Standardabweichung

$$\sigma(E) = \sigma(e_0) = 0,3ADC.$$

Nach Fehlerfortpflanzungsgesetz ergeben sich für die Größen x und y mit

$$x = a \frac{u}{v} \text{ und } y = bw^{\pm c} \quad \text{die Fehler}$$

$$\text{i) } \frac{\sigma^2(x)}{x^2} = \frac{\sigma^2(u)}{u^2} + \frac{\sigma^2(v)}{v^2} \text{ und ii) } \frac{\sigma(y)}{y} = c \frac{\sigma(w)}{w}.$$

Damit ist für $a = 1$, $u = E$ und $v = E_0$ mit i)

$$\sigma\left(\frac{E}{E_0}\right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma^2(E)}{E^2} + \frac{\sigma^2(E_0)}{E_0^2}\right)} \frac{E}{E_0}$$

und für $b = 1$ und $w = \frac{E}{E_0}$ somit

$$\begin{aligned} \sigma(CTE) &= c \frac{\sigma\left(\frac{E}{E_0}\right)}{\frac{E}{E_0}} CTE = c \frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma^2(E)}{E^2} + \frac{\sigma^2(E_0)}{E_0^2}\right)} \frac{E}{E_0}}{\frac{E}{E_0}} CTE \\ &= c \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma^2(E)}{E^2} + \frac{\sigma^2(E_0)}{E_0^2}\right)} CTE \end{aligned}$$

Gleichung 7-3

Diese Standardabweichung geht in die Fehlerbalken ein.

7.4.1 Temperaturabhängigkeit der CTE

Die Temperaturabhängigkeit der CTE in den schnellen Modes konnte nicht geklärt werden, da aus Zeitgründen dort keine Temperaturreihen-Messungen vorgenommen wurden.

7.4.2 Ratenabhängigkeit der CTE

7.4.2.1 Timing Mode

Die Abhängigkeit der CTE von der eingestrahnten Rate wurde mit Ge-K-Photonen der Energie 9886 eV mit Hilfe der Schlitz-Schlitz-Methode (siehe 6.2.1) untersucht. Für jede Spalte kann bei jeder der gemessenen Raten eine separate CTE angegeben werden. Als Beispiel hierfür zeigt Abbildung 7-18 die Ratenabhängigkeit der CTE von Spalte 7 in CCD 0, Quadrant 0. Die CTE ändert sich hier bei einer Ratenvergrößerung um den Faktor 3,3 um 0,01 Promille.

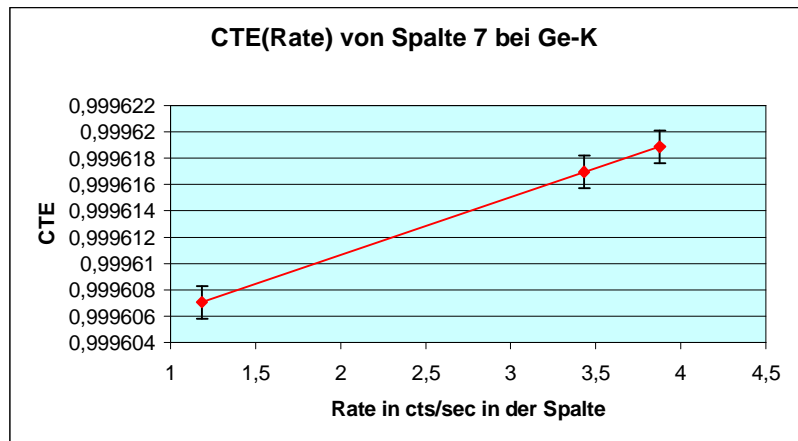


Abbildung 7-18: Ratenabhängigkeit der CTE von Spalte 7 in CCD 0, Quadrant 0

Des weiteren wurde die CTE verschiedener Spalten bei gleicher Rate und gleicher Energie untersucht. Dabei zeigte sich, wie Abbildung 7-19 deutlich macht, daß die CTE einzelner Spalten sehr unterschiedlich sein kann.

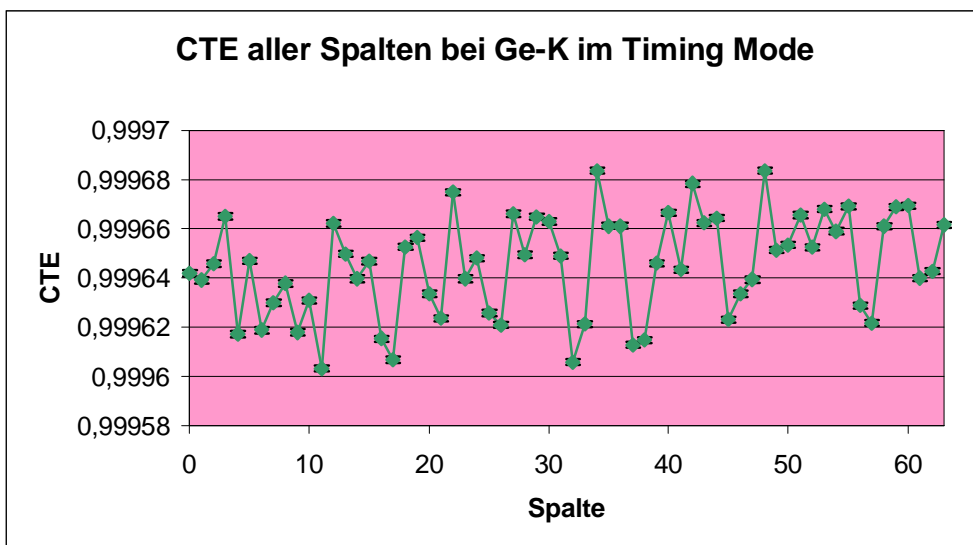


Abbildung 7-19: CTE aller Spalten bei Bestrahlung mit Ge-K-Photonen mit einer Rate von 3,77 cts/s pro Spalte

Das gleiche Phänomen verdeutlicht auch Abbildung 7-20, in der das Mittel der CTE aller Spalten bei verschiedenen Raten aufgetragen ist. Die blauen Balken sind keine Fehlerbalken, sondern die Standardabweichung des Mittels aller Spalten. Man kann hieraus folgern, daß der Unterschied in der CTE einzelner Spalten wesentlich größer ist als die CTE-Erhöhung, die die Vergrößerung der Rate um einen Faktor 3,3 erzeugt.

Die Verbesserung der CTE bei höherer Rate läßt sich durch die Absättigung der Störstellen bei größerem Ladungstransport erklären. Da die Anzahl der Störstellen endlich ist, muß prozentual weniger Ladung verloren gehen, wenn viel Ladung transportiert wird.

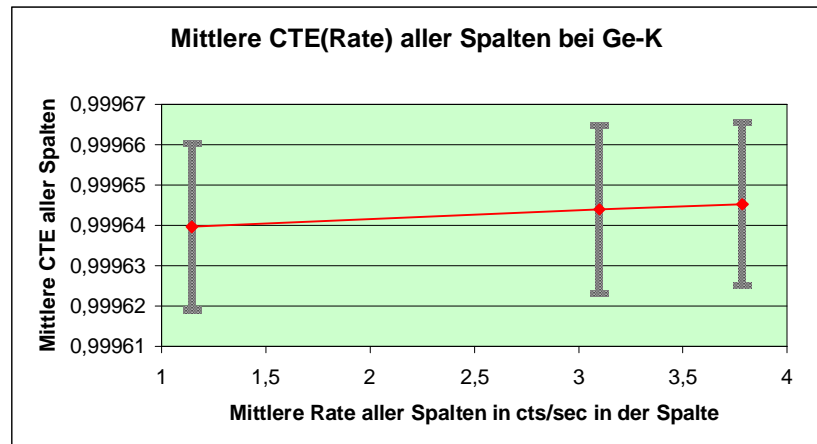


Abbildung 7-20: Mittlere CTE aller Spalten bei verschiedenen Raten

7.4.3 Energieabhängigkeit der CTE

Die Energieabhängigkeit der CTE in den schnellen Modes konnte mit Hilfe der in 6.2 dargestellten Methoden ohne die Einwirkung des Partial-Event-Effekts bestimmt werden, da dieser in die zur Berechnung der CTE notwendigen Energien gleichermaßen eingeht, sich jedoch im Verhältnis der beiden Energien nicht bemerkbar machen kann.

7.4.3.1 Timing Mode

Im Timing Mode wurde die Energieabhängigkeit der CTE auf zwei Arten untersucht. Zuerst sollen die Ergebnisse der Schlitz-Schlitz-Methode aus den Messungen vom LURE/IAS in Orsay besprochen werden.

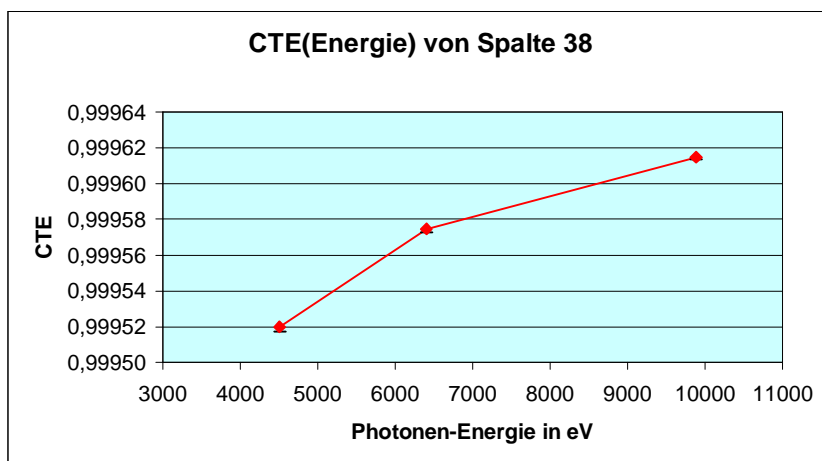


Abbildung 7-21: Energieabhängigkeit der CTE von Spalte 38

Bei drei Energien von 4511 – 9886 eV wurde für jede Spalte die CTE einzeln berechnet. Stellvertretend wird an dieser Stellen der Verlauf der CTE von Spalte 38 gezeigt. Im Unterschied zu der in 7.4.2.1 besprochenen Ratenabhängigkeit wirkt sich die Verbesserung der CTE zu höheren Energien stärker aus als die Abweichung in der CTE einzelner Spalten

(siehe Abbildung 7-22). Insgesamt wird die CTE bei einer Vergrößerung der eingestrahlichten Photonen-Energie vom Faktor 2,2 um 0,09 Promille besser.

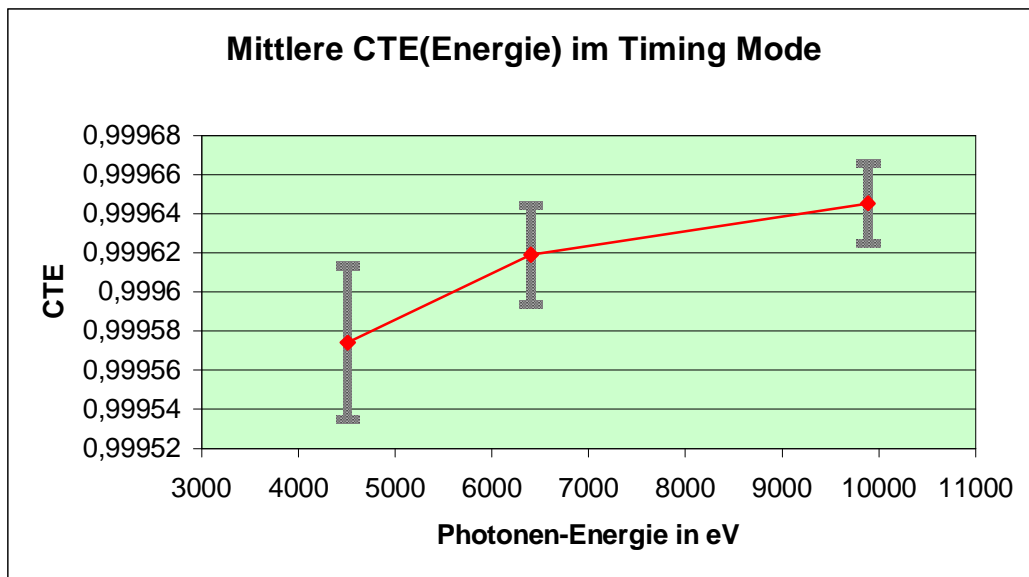


Abbildung 7-22: Energieabhängigkeit der CTE im Vergleich zur CTE-Schwankung einzelner Spalten

Auch in diesem Fall lässt sich die Verbesserung der CTE aufgrund des prozentual kleineren Ladungsverlustes beim Transport von größeren Ladungsmengen erklären. Wiederum ist die Endlichkeit der Störstellen der entscheidende Punkt der Argumentation. Genauso wie mehrere niederenergetische Photonen die zu transportierende Ladungsmenge erhöhen, so erhöht auch ein höherenergetisches Photon dieselbe.

Anhand der Out-Of-Fokus-Messungen der PANTER-Eichung wurde ebenfalls die Energieabhängigkeit der CTE mit Hilfe der „Doppelten Out-Of-Fokus-Methode“ (6.2.3) untersucht. Die Zeilenposition des Fokus in der Stellung gegenüber des CAMEX wurde mit Hilfe einer

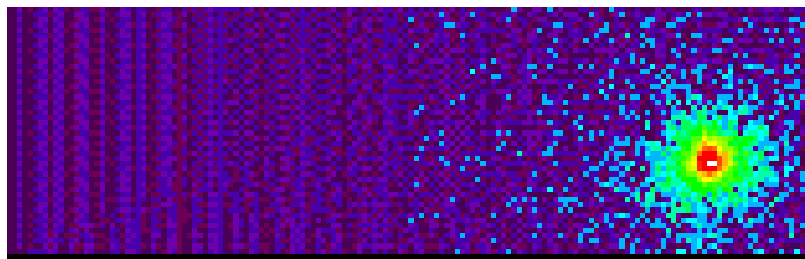


Abbildung 7-23: Bestimmung der Position des Fokus mit einer Messung im Window Mode

Messung im Window Mode bei Zeile 177 lokalisiert (Abbildung 7-23). Dieser Position entspricht die Einstellung der Achse A12 des Manipulators im PANTER mit $A12 = 42863$. Ein Schritt in der Achse A12 entspricht $1,25 \mu\text{m}$. Dadurch ergibt sich für die zweite Fokusposition

mit $A12 = 62800$ und der Größe eines Pixels von $150 \mu\text{m}$ die Zeile 11. Abbildung 7-24 zeigt die erhaltenen CTE-Werte aus diesen Messungen im Vergleich zu den aus den Schlitzmessungen gewonnenen Werten: Der Unterschied in der CTE ist enorm.

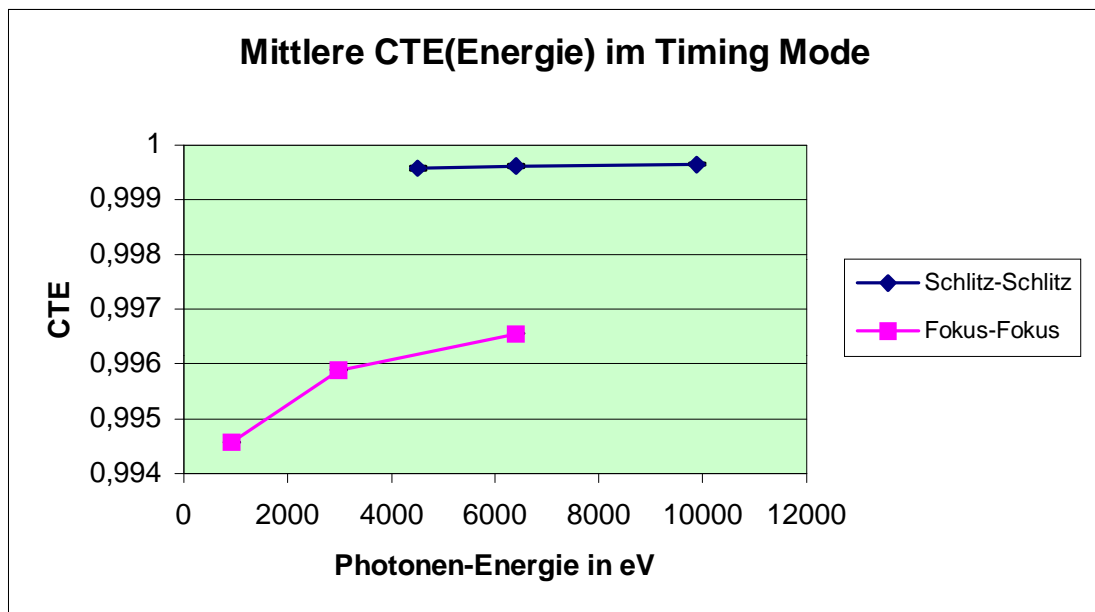


Abbildung 7-24: Vergleich der aus Schlitz- bzw. Fokus-Messungen gewonnenen CTE

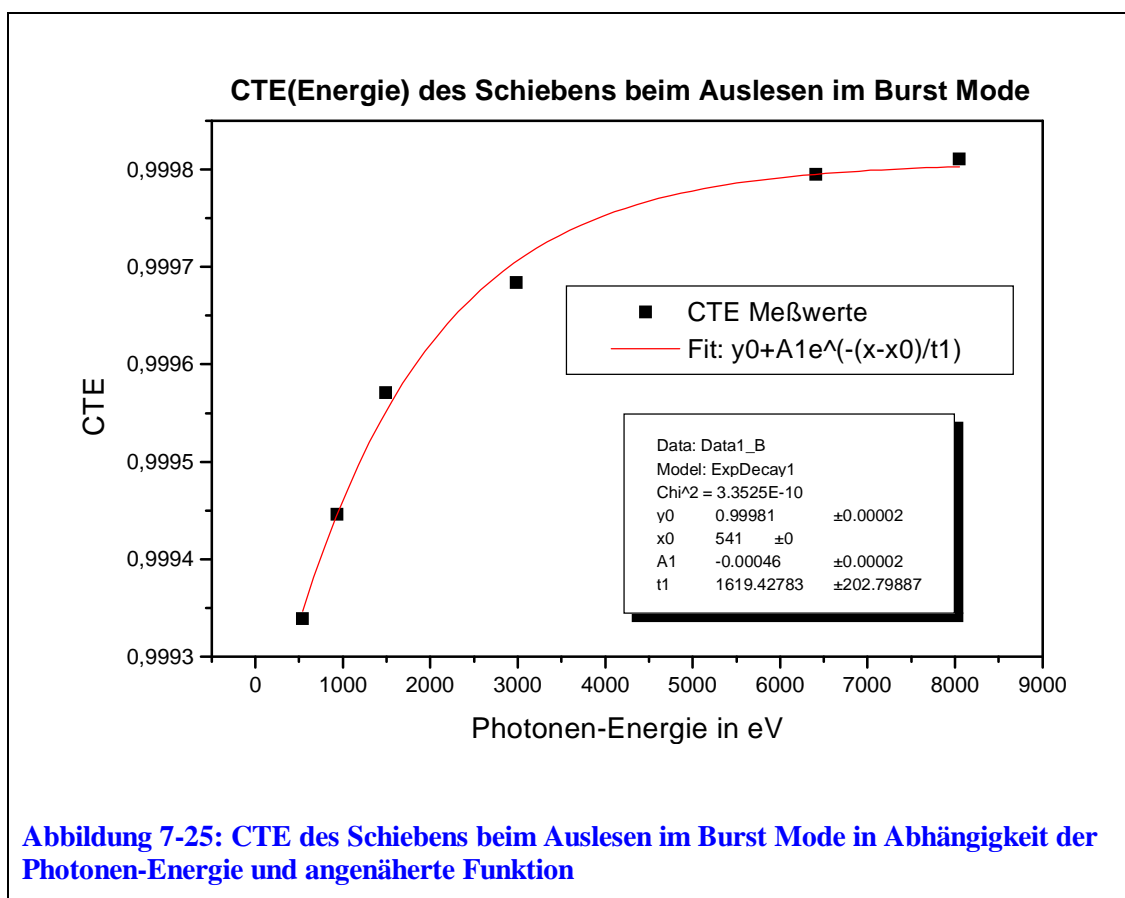
Auch hier scheint sich die Änderung der Rückkontaktspannung deutlich zu machen: Die im PANTER vor der Rückkontaktspannungs-Änderung genommenen Daten zur Bestimmung der CTE können aus diesem Grunde nicht als aktuelle CTE angesehen werden, da sich das CCD nach der Änderung der Rückkontaktspannung offenbar in einem Zustand befindet, der nicht mehr mit dem vorherigen vergleichbar ist.

7.4.3.2 Burst Mode – schnelles Schieben

Eine CTE-Bestimmung des schnellen Schiebens beim Burst Mode war nicht möglich, da man im Burst Mode nicht über eine Referenzenergie E_0 am CAMEX verfügte. Dazu müßte in nachfolgenden Messungen ein modifizierter Burst Mode programmiert werden, der es erlauben würde, zu Kalibrationszwecken auch Messungen am CAMEX durchführen zu können.

7.4.3.3 Burst Mode – langsames Schieben während des Auslesens¹²

Für das langsame Schieben während des Auslesens ist es möglich, eine CTE zu bestimmen, indem man die in den einzelnen Zeilen deponierte Energie als einfache Funktion der Zeile aufträgt und dann aus der Steigung dieses Plots die CTE berechnet. Mit Hilfe von „flag“ wurde so die CTE für verschiedene Energien bestimmt. Dieser Auswertung liegen Out-Of-Fokus-Messungen gegenüber des CAMEX aus der PANTER-Eichung zugrunde. Abbildung 7-25 zeigt den Verlauf der CTE über fünf eingestrahelte Energien von 541 – 8048 eV und einen Fit an die Datenpunkte. Auch hier kann die Verbesserung der CTE mit zunehmender Photonenenergie wieder durch die Störstellenabsättigung (wie in 7.4.2.1 und 7.4.3.1) erklärt werden.



7.5 Verifizierung der Zeitauflösung der MAXI-Kamera¹³

In der PANTER-Testanlage und ebenso am LURE/IAS in Orsay wurde die Zeitauflösung der MAXI-Kamera mit Röntgenstrahlung periodischer Intensität getestet. Am PANTER simulierte man die periodische Strahlung mit Hilfe eines mechanischen Chopperrades, welches sich vor der Röntgenquelle befand. Damit konnte man eine sinusförmige Intensitätsmodulation erreichen.

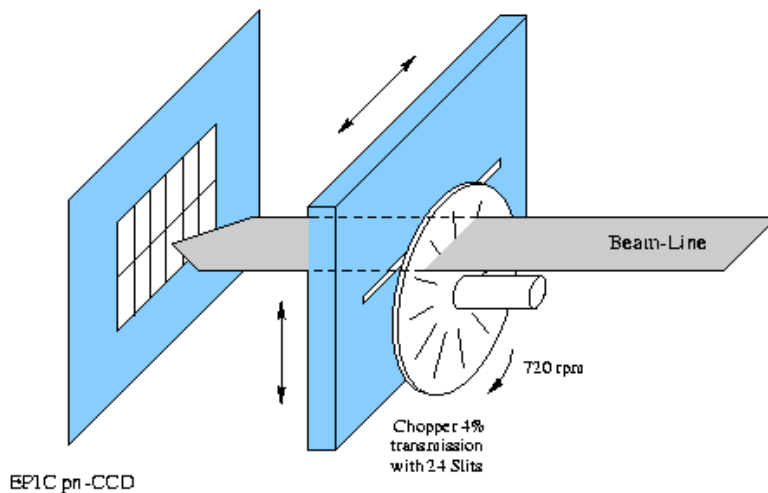


Abbildung 7-26: Schematische Darstellung der Anordnung zur Untersuchung der Zeitauflösung des pn-CCDs in Orsay

Schieberichtung des CCDs (Abbildung 7-26). Man führte diese Messungen im Timing Mode bei einer Photonen-Energie von 1865 eV durch. Abbildung 7-27 zeigt ein im Full Frame Mode erzeugtes Bild, bei Stillstand des Chopperrades, mit einer symbolischen Überblendung des Chopperrades.

In den jeweiligen CCDs 0 der Quadranten 0 und 1 wurden auf diese Weise Bereiche von ca. 20 Pixeln in den Schnittstellen zwischen dem horizontalen Schlitz und einem der 24 Schlitze des Chopperrades beleuchtet.

Im Timing Mode ließ man nun das Chopperrad mit 720 Umdrehungen pro Minute drehen. Zöge man die gesamten Daten des im Timing Mode arbeitenden CCDs zur Auswertung heran, sähe man lediglich eine leichte Intensitätsschwankung. Betrachtet man jedoch nur eine einzelne Spalte und faltet die detektierten Events mit einer Periode von 3,4717 ms, so zeigt das Pulsprofil kurze Rechteckspulse.

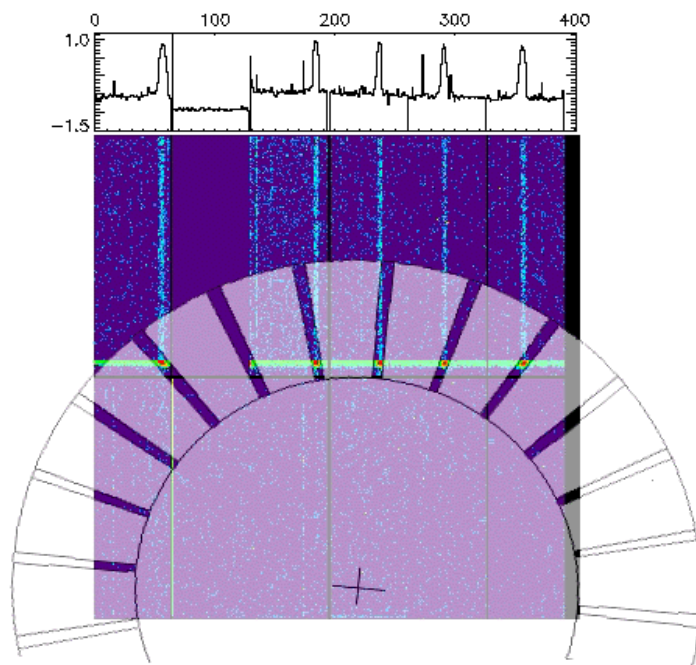


Abbildung 7-27: Überlagerung eines im Full Frame Mode erzeugten Bildes bei Stillstand des Chopperrades und des Chopperrades selbst

Abbildung 7-28 zeigt das Pulsprofil der Spalte 0 des CCD 0 von Quadrant 0. Auf diese Weise wurde die exzellente Zeitauflösung der MAXI-Kamera verifiziert.

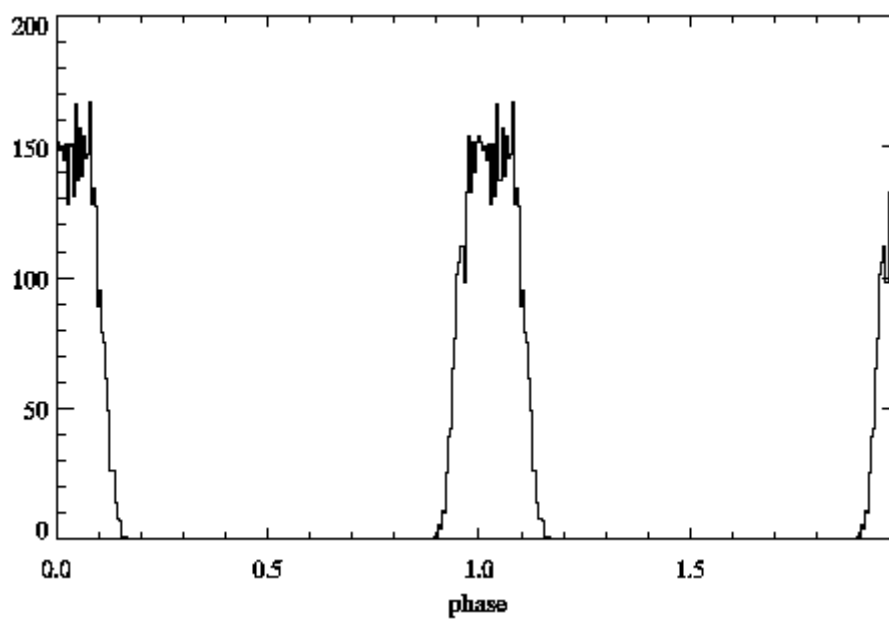


Abbildung 7-28: Pulsprofil der Spalte 0 bei einer Periode von 3,4717 ms

7.6 Untersuchung des Pile-Up-Verhaltens für Punktquellen¹⁴

In der PANTER-Anlage konnte man, wie in 5.1 beschrieben, Untersuchungen mit dem Spiegel durchführen. Um Aussagen über das Pile-Up-Verhalten (siehe 4.5.1.4) von Punktquellen in den schnellen Modes machen zu können, wurde das pn-CCD im Fokus des XMM-FM3-Spiegelmoduls bei verschiedenen Raten betrachtet. Im Timing Mode variierte man die Rate von 250 bis 12 000 Photonen/Sekunde in der PSF (Point Spread Funktion), im Burst Mode von 28 000 bis 46 000 Photonen /Sekunde in der PSF.

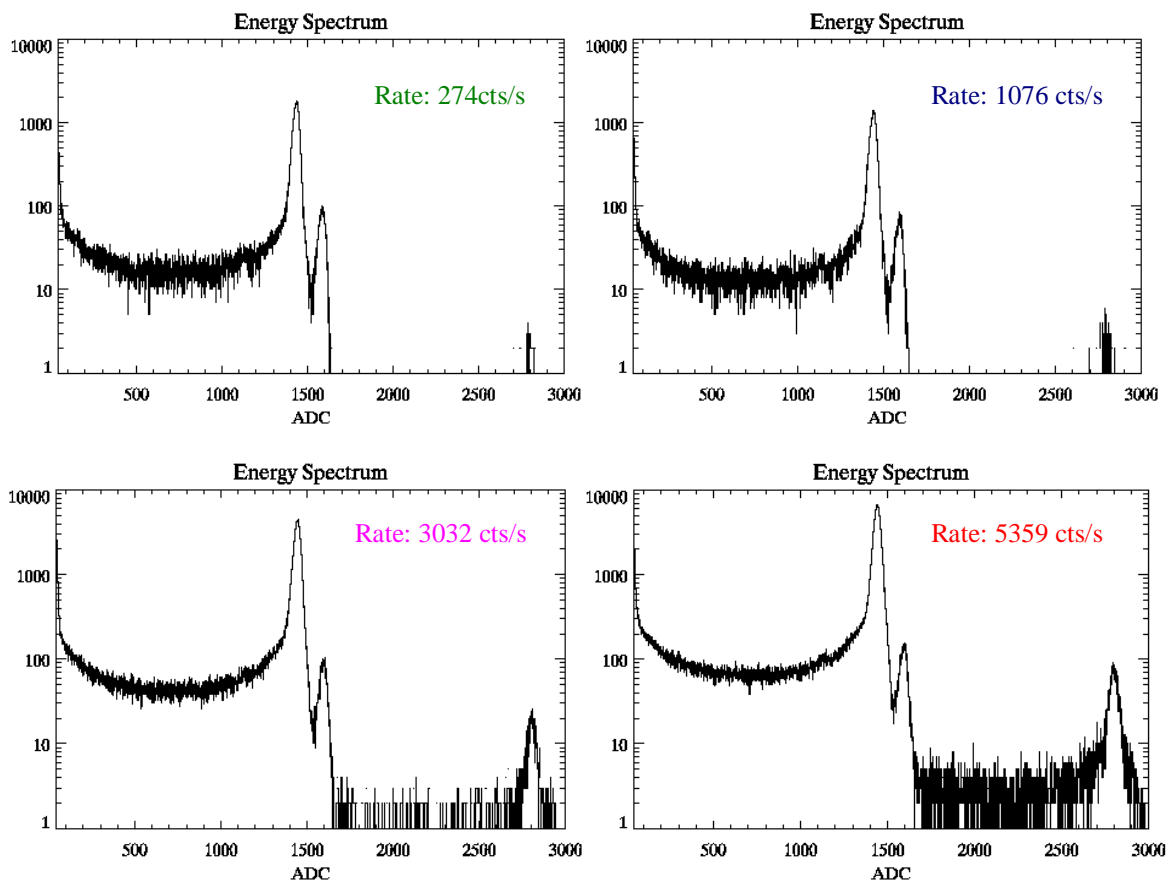


Abbildung 7-29: Rohspektrum einer Fe-K-Linie bei verschiedenen Raten im Timing Mode

Abbildung 7-29 zeigt Rohspektren im Timing Mode bei vier verschiedenen Photonenraten. Man sieht deutlich, wie die Pile-Ups bei zunehmender Rate ansteigen. Die Mehrzahl der Pile-Ups wird bei der doppelten eingestrahelten Energie E_0 detektiert. Bei höheren Raten füllt sich auch das Energieband zwischen E_0 und $2E_0$ mit Pile-Ups. Dies wird durch die Überlagerung von Single-Events mit Split-Events verursacht.

In Abbildung 7-30 ist der Anteil der Pile-Ups in bezug auf die gesamten Events als Funktion der Photonen-Rate in Timing und Burst Mode aufgetragen. Diese Untersuchung zeigte, daß die MAXI-Kamera in der Lage sein wird, extrem helle Punktquellen zu beobachten.

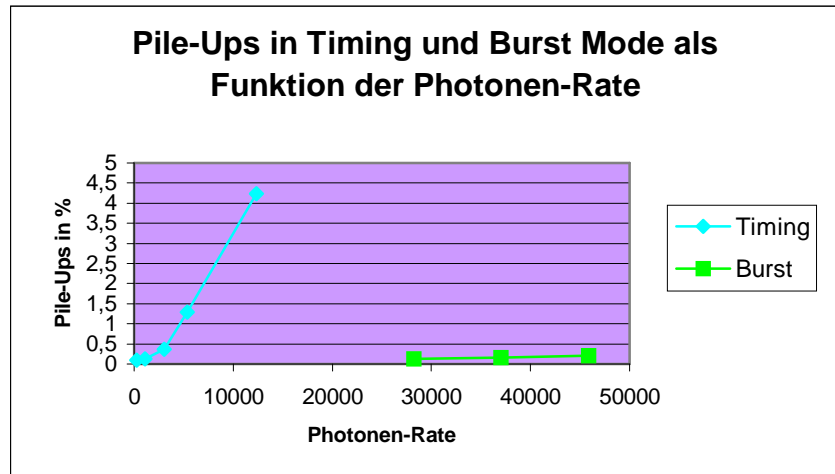


Abbildung 7-30: Pile-Up-Verhalten in Timing und Burst Mode

7.7 Vergleich der CTE im Timing Mode mit der CTE im Full Frame Mode

Einen direkten Vergleich der CTE kann man bei der Fe-K-Linie führen. Laut 7.4.3.1 beträgt die mittlere CTE im Timing Mode bei der Energie 6404 eV: $0,99962 \pm 0,00003$ (1σ der Schwankung der CTE der einzelnen Spalten).¹⁵

Im Full Frame Mode ergibt sich bei der gleichen Energie eine CTE von $0,99958 \pm 0,00003$ (1σ der Schwankung der CTE der einzelnen Spalten).

Einige Untersuchungen im Full Frame Mode bezogen noch die „Geschichte des Photons“ mit ein. (Es handelt sich hierbei um Methoden, die die CTE in der Abhängigkeit von Vorgängerphotonen, die Störstellen absättigen können, betrachten.) Diese Untersuchungen ergaben bei Fe-K eine CTE von 0,99953 ohne Vorläufer bis zu einer CTE von 0,99977 mit Vorläufer.¹⁶

