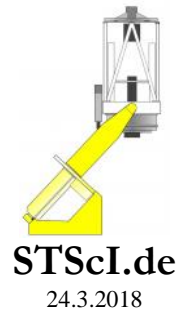


# Photonen & Elektronen

## Zur Bewertung von CCD-Kameras

Thomas Eversberg

Schnörringen Telescope Science Institute – Waldbröl



### Zusammenfassung

Beim Verkauf von CCD-Kameras verweisen Händler aber auch ihre Kunden als Qualitätsmerkmal meistens auf die Quanteneffizienzen der CCD-Chips, die in den jeweiligen Kameras verbaut sind. Im folgenden Text beschreibe ich die wahre Situation und erläutere den entscheidenden Parameter zur Bestimmung der Kameraqualität.

---

### Quanteneffizienz und Rauschen

Die meisten Amateurastronomen achten beim Kauf einer neuen CCD-Kamera primär auf eine möglichst hohe Lichtausbeute, also das Lichtsammelvermögen bei verschiedenen Wellenlängen und interpretieren die entsprechenden Herstellerangaben (i.d.R. Effizienzkurven über die Wellenlänge) als entscheidendes Qualitätsmerkmal für die jeweilige Kamera. In Wirklichkeit sagt diese Quanteneffizienz (QE) jedoch nur etwas über die Qualität des CCD-Chips aus, nichts aber über die gesamte Kamera. In der Realität entscheidet jedoch die Interaktion zwischen Chip und Kameraelektronik über die Qualität des Gesamtsystems.

Die Elektronik liefert zwei Rauschanteile, die sich in jedem ausgelesenen Bild eintragen. Diese sind das **Dunkelrauschen** und das **Ausleserauschen**.

- **Dunkelrauschen** wird durch temperaturabhängige Schwingungen in den Siliziumkristallen des CCD-Substrats erzeugt. Es überlagert sich mit den in der Astronomie normalerweise sehr schwachen Signalen und degradiert die Datenqualität entsprechend. Eine exakte Dateninterpretation wird dadurch erschwert. Um Dunkelrauschen zu minimieren werden astronomische Kameras daher i.d.R. gekühlt. Heutzutage setzen astronomische Kameras diese Kühlung effizient um (Peltierkühlung bei Amateuren, Stickstoffkühlung bei den Profis) und man kann das

Dunkelrauschen in der Regel entsprechend einfach aus den Daten extrahieren. Dies geschieht, indem man Dunkelbilder, sog. Darks aufnimmt und diese innerhalb einer entsprechenden Datenreduktionsroutine aus den Rohdaten eliminiert. Die Störungen sind allerdings oft so klein, dass man sie beinahe vernachlässigen kann.

- **Ausleserauschen** hingegen wird von der individuellen Kameraelektronik erzeugt und wird von dem Design der internen Schaltkreise dominiert, welche elektrische Schwingungen hoher Frequenz erzeugen. Wenn 10 Millionen binäre Signale eines Chips mit 5 Millionen Pixel in z.B. 10 Sekunden ausgelesen werden, geschieht dies bei 1 Millionen Werten pro Sekunde. Das ist ein Wechselstromsignal von 1 MHz. Bei solchen Frequenzen bilden unglücklich verlegte Leiterbahnen in der Elektronik Schwingkreise, die das Auslesesignal stören können. Daher sind beim Bau solcher Schaltkreise Entwicklungserfahrung und Versuchsaufbauten nötig, um das optimale Design der Elektronik zu finden und damit das Ausleserauschen zu minimieren.

### Gain

Wenn ein CCD-Chip ausgelesen wird, müssen die von den Photonen erzeugten Ladungen der Pixel-Elektronen über eine Kapazität in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Ein sogenannter Analog-Digital-Wandler wandelt diese Spannung in ein digitales Signal um, welches dann ausgelesen wird. Das Verhältnis zwischen der Anzahl aller Elektronen pro Pixel und den erzeugten Analog-Digital-Units (ADU, oft auch mit „Counts“ beschrieben) wird als Gain oder auch Gewinn bezeichnet. Der Gain wird der Helligkeit des beobachteten Objekts über die Steuersoftware der Kamera angepasst, da sonst z.B. ein helles Objekt hohe Spannungswerte liefert, die dann zu einem Signal-Überlauf führen können.

### Die Kombination ist entscheidend

Im realen Betrieb ist die Quanteneffizienz allein kein angemessener Parameter zu Bewertung der gesamten Kamera. Alle aufgenommenen Signale (Photonen) werden von der internen Ausleseelektronik in ADU umgesetzt. Somit muss die Elektronik in alle Betrachtungen einbezogen werden. Dazu ein Beispiel mit zwei unterschiedlichen Kameras.

Die MegaTek von Frank Fleischmann arbeitet mit dem TK1024-Chip von Tektronics. Dieser Chip wird zwecks Effizienzsteigerung bei blauen Wellenlängen auf seiner Rückseite beleuchtet und erreicht damit außerordentlich hohe Effizienzwerte so dass er noch heute bei Profis Verwendung findet. Abbildung 1 zeigt seinen Effizienzverlauf über die Wellenlänge.

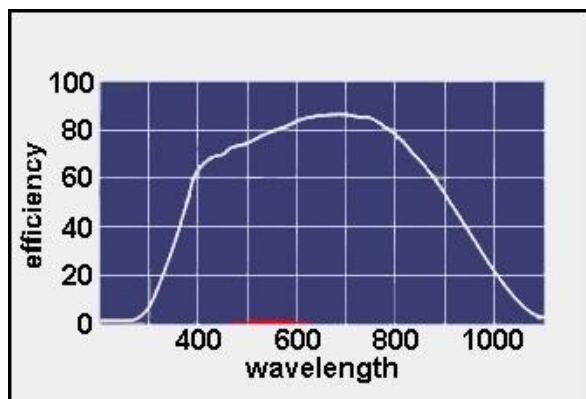


Abb. 1: Effizienzverlauf über die Wellenlänge des TK 1024 CCD-Chips von Tektronics. Man beachte die rote Null-Linie zwischen 500 und 600 Nanometer. Sie repräsentiert die ungefähre Empfindlichkeit des menschlichen Auges.

Die Kamera Sigma 1603 von Gerhard Fischer hingegen arbeitet mit dem KAF1603ME-Chip von Kodak. Abbildung 2 zeigt dessen Effizienzverlauf über die Wellenlänge.

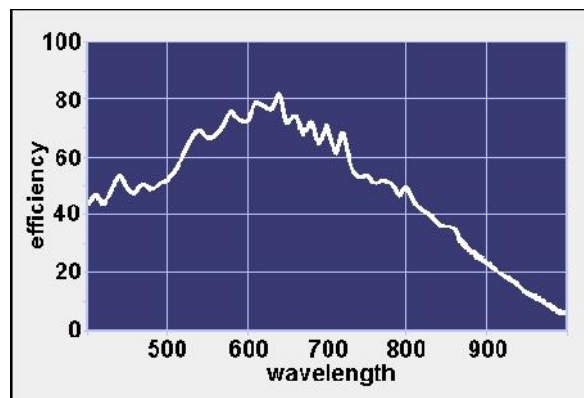


Abb. 2: Effizienzverlauf über die Wellenlänge des KAF1603ME-Chip von Kodak.

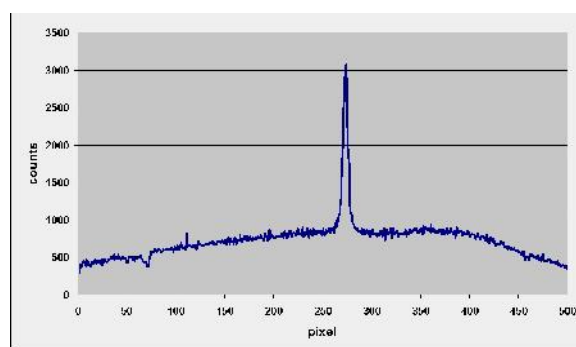


Abb. 3: Spektrum des Sterns  $\gamma$  Cas mit einer H $\gamma$ -Emissionslinie bei 6562 Angström aufgenommen mit einer MegaTek / TK1024.

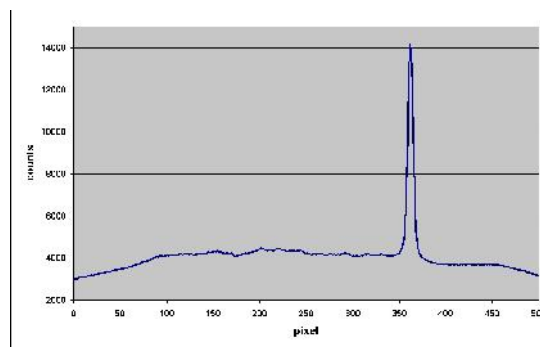


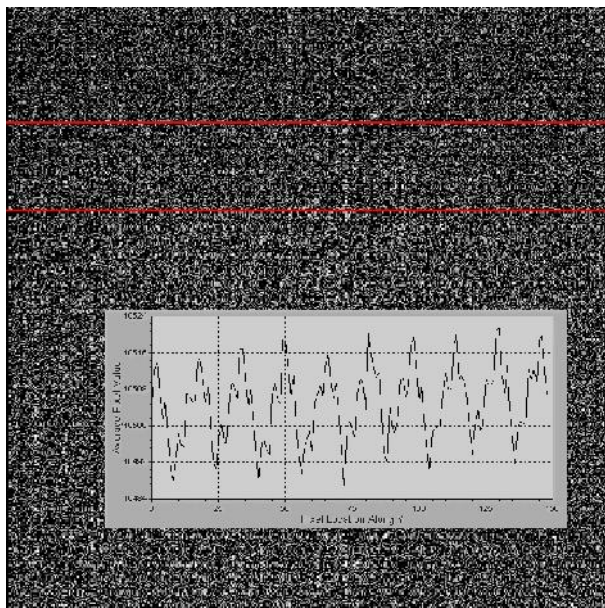
Abb. 4: Wie Abbildung 3 nun jedoch aufgenommen mit einer SIGMA / KAF1603.

Der Tektronics-Chip ist dem Kodak-Chip hinsichtlich der Quanteneffizienz über die Wellenlänge signifikant überlegen und die meisten Nutzer würden sich hier sicher für ihn entscheiden, wenn Sie die QE als einziges Kriterium heranziehen würden. Nimmt man mit diesen beiden Kameras Spektren auf, zeigt sich jedoch ein genau entgegengesetztes Bild. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen dazu zwei mit diesen beiden Kameras aufgenommene Spektren des Emissionsliniensterns  $\gamma$  Cas mit der prominenten H $\alpha$ -Linie bei 6562 Angström.

Offenbar liefert die Megatek trotz besserer QE des Chips bei gleichen Randbedingungen (Teleskop, Belichtungszeit) ein sehr viel stärker rauschendes Spektrum als die Sigma, obwohl deren Quanteneffizienz höher ist. Das Spektrum der Megatek hat ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis (S/N) von etwa 20, während das Spektrum der Sigma ein S/N von etwa 300 besitzt.

Die Erklärung dieser Diskrepanz liefert eine Aufnahme, welche möglichst kurz belichtet wird (am besten Null Sekunden). Solch eine Aufnahme lie-

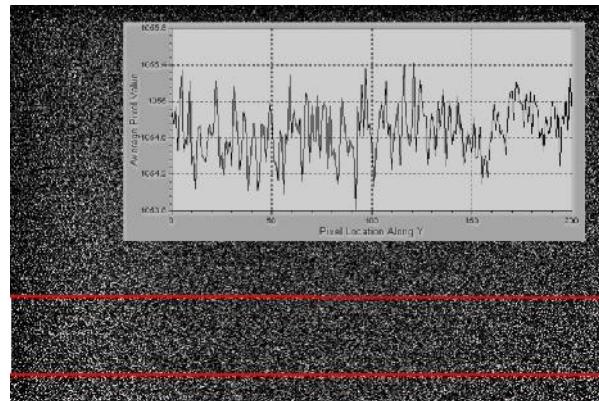
fert nur die zufälligen Restladungen, die nach dem Auslesen immer auf dem Chip zurückbleiben und die Informationen damit beeinflussen (engl. Bias). Abbildung 5 zeigt ein Bias der Megatek. In dem Kasten sind die Spaltenmittelwerte des roten Chipintervalls abgebildet. Offenbar finden sich periodische Intensitätsschwankungen auf dem Chip, die mit den Pixelspalten auf dem Chip korreliert sind. Angesichts der Herstellungsprozesse von CCD-Chips ist es höchst unwahrscheinlich, dass der Chip diese Schwankungen erzeugt. Die Ursache für dieses Verhalten kann nur im Ausleseverstärker lokalisiert werden. Offenbar liest er verschiedene Spalten zyklisch mit unterschiedlicher Qualität aus. Damit ist die Elektronik für kurze Belichtungen nicht brauchbar. Bei längeren Belichtungen ist das Problem weniger dramatisch, doch weiterhin unerwünscht. Abbildung 6 zeigt das Bias für die Sigma. Hier sind die Restladungen statistisch verteilt und dementsprechend auch das Ausgangssignal. Die Kamera inkl. Elektronik liefert Signale, die nicht von der Position auf dem Chip abhängen sondern wie erwartet statistisch gleichverteilt sind.



**Abb. 5: Bias der Megatek sowie die Mittelwerte der im roten Chipintervall aufgenommenen Pixelspalten.**

Für eine quantitative Analyse muss man auch den jeweiligen Gain der Kamera berücksichtigen denn das Bild auf dem Rechner wird nicht von den Photonen erzeugt, die auf den Chip fallen, sondern von den durch den Verstärker erzeugten digitalen Signalen (ADU). Der Gain (Gewinn) sagt, wie viele Elektronen eine ADU liefern. Dazu bestimmen wir mit einem einfachen Leseprogramm den mittleren ADU-Wert auf dem Chip sowie dessen Standardabweichung und verrechnen dies mit dem Gain um

dann einen brauchbaren Wert für die Signale am Kameraausgang zu erhalten. Tabelle 1 zeigt hierzu den jeweiligen Gain der beiden Kameras, die gemessenen Signalstärken über den Chip sowie deren Streuung.



**Abb. 6: Bias der Sigma sowie die Mittelwerte der im roten Chipintervall aufgenommenen Pixelspalte.**

	Megatek	Sigma
Gain	2.3 Elektronen / ADU	1.8 Elektronen / ADU
Mittelwert	10500 ADU	1050 ADU
Standardabweichung $\sigma$	55 ADU	8 ADU

**Tab. 1: Gain und ADU sowie deren Streuung für die Megatek und die Sigma.**

Offensichtlich liefert die Megatek eine rund 7mal größere Streuung der Pixelwerte (55ADU / 8ADU). Mit dem Gain können wir nun die Standardabweichung pro Pixel = Gain \* Streuung berechnen.

Die Chipdaten am Ausgang der Megatek zeigen also eine 9mal höhere Streuung als die am Ausgang der Sigma. Damit können wir auch quantitativ aussagen, dass die Ausleseelektronik der Megatek deutlich rauscht als die der Sigma, was das signifikant schlechtere S/N bei gleichen Randbedingungen zwanglos erklärt.

Die primäre Ursache für dieses Problem ist ebenfalls identifizierbar. Die Controller der Megatek-Elektronik sind für Signale im Millivoltbereich ausgelegt. Der Tektronix-Chip liefert jedoch nur Signale im Mikrovoltbereich, sie sind also rund 1000mal geringer. Hier zeigt sich, wie wichtig eine harmonische Abstimmung zwischen Chip und Ausleseelektronik ist.

Man muss dabei anmerken, dass das mit der Belichtungszeit linear steigende Signal der Zielobjekte ab einer bestimmten Belichtungszeit über das Niveau des Rauschuntergrunds steigt weil das Rauschen

einer Wurzelfunktion folgt. Daher liefert die Megatek sehr gute Daten bei Deep-Sky Beobachtungen mit hinreichend langen Belichtungszeiten. Bei kürzeren Belichtungszeiten im Minutenbereich wird dieser Zustand jedoch nicht erreicht und die Megatek ist für diese Anwendungen weniger geeignet. Bevor man sich also für eine bestimmte Kamera entscheidet, sollte man sich die entscheidenden Parameter vor Augen halten und ein Bias von jedem Hersteller zwecks eigener Analyse anfordern. Die hervorragenden Deep-Sky Aufnahmen in den Werbebroschüren verschiedener CCD-Kameras reichen für eine echte Bewertung nicht aus.

Eine Liste verschiedener Kameras und ihrer wichtigsten Parameter findet sich unter <http://astrosurf.com/buil/isis/noise/result.htm>