

Mathematische Modellierung des Signal zu Rausch Verhältnisses

Andreas Schmitz

25.02.2016

Danksagung

Ich wollte mich an dieser Stelle noch bei Norbert Gulde aus dem astrotreff Forum bedanken, der mir mit seinem Fachwissen und seiner langjähriger Erfahrung wirklich sehr weitergeholfen hat. In dem Umfang wirklich kein Selbstverständnis mehr.

Inhaltsverzeichnis

1	Wichtige Rausch- und Signalarten und deren Bestimmung	5
1.1	Signal des beobachteten Objekts	5
1.2	Signal des Himmelshintergrunds	6
1.3	Rauschen des beobachteten Objekts	6
1.4	Rauschen des Himmelshintergrunds	7
1.5	Ausleserauschen oder Readout Noise	7
1.6	Thermisches Rauschen (Dunkelstrom, Darknoise etc., Thermal Noise usw.)	7
1.7	Stacken von Bildern	10
2	Bestimmung wichtiger Randdaten der Kamera	10
2.1	Gain	10
2.2	Bits pro Pixel	11
2.3	Fläche der Teleskopöffnung	11
2.4	Quanteneffizienz des Sensors	11
2.5	Lichtintensität eines astronomischen Signals	11
3	Bestimmung des Signal zu Rauschverhältnis in unserem Beispiel	12
3.1	Signal	12
3.2	Rauschen	12
3.3	Abhängigkeiten der Terme von Temperatur, ISO, Belichtungszeit, Hintergrundhelligkeit, Objekthelligkeit	13
4	Bestimmung des Dynamikumfangs in unserem Beispiel	13
4.1	Wie sieht es nun aus, wenn wir mehrere Bilder stacken?	14
4.2	Reales Beispiel	14

Nomenclature

η	Quanteneffizienz
μ	Erwartungswert
σ_{pix}	Standardabweichung der Pixelwerte aus dem NoiseEvaluation Script von PixInsight
B_{sensor}	Bitanzahl der Sensors
$beta$	Winkelausdehnung des astronomischen Objekts
G	Gain des Sensors [$\frac{e^-}{ADU}$]
$Q_{fullwell}$	Full-Well Kapazität eines Sensors
A	Fläche in m^2
B	Brennweite des Teleskops
I	Lichtintensität in $\frac{Photonen}{m^2s}$
m	Scheinbare Helligkeit in mag
N	[-] Anzahl der Rauschelektronen
n	Anzahl Bilder
P	Pixelanzahl des Sensors
S	[-] Anzahl der Signalelektronen
t	Zeit in Sekunden

1 Wichtige Rausch- und Signalarten und deren Bestimmung

Das Signal zu Rauschverhältnis ist wie folgt definiert:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S_{Obj}}{\sigma_{rauschen}}$$

Wir benötigen also nur die Standardabweichung des Rauschens und die Amplitude des eigentlichen Signals. Diese zu modellieren ist allerdings nicht so einfach.

Grundsätzlich wird Rauschen in unserem Fall als Standardabweichung gemessen (welche wir in diesem Dokument im Weiteren mit σ bezeichnen), also die mittlere Schwankung um den wahren Wert. Als Maßeinheit wird die Elektronenanzahl verwendet.

Nochmal kurz zur Wiederholung: Die Varianz ist die quadrierte Standardabweichung $var = \sigma^2$. Außerdem haben wir es hier mit oftmals einer Poissonverteilung zu tun, bei der die Varianz gleich dem Erwartungswert ist:

$$\sigma^2 = \mu$$

Dieser Zusammenhang wird in diesen Berechnungen sehr hilfreich sein.

1.1 Signal des beobachteten Objekts

Das Signal (egal welcher Herkunft) als mittlere Anzahl an Photonen pro Pixel kann über folgende Formel berechnet werden:

$$S_{\text{photonen}} = \frac{I * t * A_{\text{Öffnung}}}{P}$$

Die Zeit t wird in Sekunden angegeben und ist die Belichtungszeit. $A_{\text{Öffnung}}$ stellt die Fläche der Teleskopöffnung dar. η ist die Quanteneffizienz des Sensors (siehe 2.4). Wie man die Lichtintensität I bestimmt könnt ihr in Kapitel 2.5 nachlesen.

$$S_{\text{elektronen}} = \frac{I * t * A_{\text{Öffnung}} * \eta}{P}$$

Beispiel anhand von M33: Im Kapitel 2.5 haben wir die Lichtintensität I für M33 bereits berechnet und diese beträgt: $4.615 * 10^7 \frac{\text{Photonen}}{\text{m}^2 \text{s}}$. Die Teleskopöffnung lag bei $A_{\text{Öffnung}} = 0.0161823 \text{m}^2$ (siehe ??). Nehmen wir weiterhin eine Einzelbelichtungszeit von $t = 300 \text{s}$ an. Die Quanteneffizienz der Kamera liegt bei ca. 0.37 (siehe 2.4). Damit kommen wir auf:

$$S_{Obj} = \frac{4.615 * 10^7 * 300 * 0.0161823 * 0.37}{P}$$

Jetzt müssen wir noch herausfinden, wieviele Pixel das Objekt auf unserem Sensor eigentlich belegt. Fangen wir an die Größe des Objekts auf dem Sensor zu bestimmen. Hierfür benötigen wir die Größe des Objekts in Bogenminuten und die Brennweite des Teleskops. Die Größe von M33 liegt bei $\beta = 70'x40'$. Für Die Brennweite nehmen wir $B = 945mm$, das entspricht dem C6 mit f/6.3 Reducer. Mit folgender Formel können wir dann sofort die Größe des Objekts auf dem Sensor bestimmen (in μm), Breite und Höhe müssen natürlich separat bestimmt werden:

$$O_{size} = B * 200000 * \tan\left(\frac{\beta * 60 * \pi}{1296000}\right) / 100$$

Setzen wir unsere Werte ein:

$$O_{sizeX} = 19242.0 \mu m$$

$$O_{sizeY} = 10995.7 \mu m$$

Da wir jetzt noch unsere Pixelgröße des Sensors $4.7\mu m$ kennen, können wir so einfach die Anzahl der Pixel bestimmen:

$$P_X = 4094 \quad P_Y = 2339$$

Setzen wir diese Werte wieder in unsere Signalformel ein, bekommen wir das Signal:

$$S_{Obj} = \frac{4.615 * 10^7 * 300 * 0.0161823 * 0.37}{4094 * 2339} = 8.66e-$$

1.2 Signal des Himmelshintergrunds

Dieses Signal können wir genauso berechnen wie das Signal des beobachteten Objekts, allerdings müssen wir hier eine andere scheinbare Helligkeit annehmen. Nehmen wir mal an, der Himmelshintergrund ist etwas dunkler als unser eigentliches Signal, nehmen wir mal 6 mag an. Damit hätten wir dann eine Intensität von

$$I = 3.501 * 10^7 \frac{Photonen}{m^2s}$$

Der Rest ist ja bereits bekannt, also:

$$S_{Back} = \frac{4.379 * 10^7 * 300 * 0.0161823 * 0.37}{5184 * 3456} = 4.39e-$$

1.3 Rauschen des beobachteten Objekts

In diesem Fall handelt es sich um Photonenrauschen und das ist Poisson Verteilt. Diese Information bedeutet:

$$\sigma^2 = \mu$$

Das bedeutet, die Varianz des Rauschterms ist einfach das Signal selbst in diesem Fall. Also

$$N_{obj} = S_{obj}$$

1.4 Rauschen des Himmelshintergrunds

Hier verhält es sich genauso wie in Kapitel 1.3.

$$N_{Back} = S_{Back}$$

1.5 Ausleserauschen oder Readout Noise

Diese Rauschquelle ist bei jeder Kamera vorhanden und hängt nicht von der Temperatur oder der Belichtungszeit ab, allerdings von der ISO Zahl. Genau dies Rauschquelle versucht man mit einem Bias Frame zu reduzieren. Wo bekomme ich den ReadNoise für meine Kamera?

Bei Sensorgen, z.B. für meine ESO1200D:
<http://www.sensorgen.info/CanonEOS-1200D.html>

Man kann diesen auch relativ einfach selbst bestimmen, aber die Werte bei sensorgen sind eigentlich recht genau. Für alle die es interessiert kann ich folgende Webseite empfehlen:

<http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/fishing-for-photons/signal-to-noise-part-3-measuring-your-camera-r1929>

Bei ISO1600 finden wir: $\sigma_{read} = 2.5e-$

Für unsere späteren Berechnungen benötigen wird allerdings die Varianz und dies für alle Pixel. Also müssen wir noch folgendes berechnen:

$$N_{read} = \sigma_{read}^2$$

$$N_{read} = 2.5^2 = 6.25e-$$

1.6 Thermisches Rauschen (Dunkelstrom, Darknoise etc., Thermal Noise usw.)

Durch thermische Bewegungen im Sensor selbst, entstehen ebenfalls Elektronen die mit unserem eigentlichen Signal nichts zu tun haben. Dieses Rauschen hängt maßgeblich von der Temperatur des Chips ab und kann durch Kühlung erheblich reduziert werden. Mit Darkframes versuchen wir diese Art des Rauschens zu reduzieren.

Merke: Thermisches Rauschen folgt keiner Poisson Verteilung, also ist die Varianz nicht gleich dem Signal selbst !!!!!

Wie kann ich das thermische Rauschen messen? Macht zwei Dunkelbilder bei der Belichtungszeit / ISO die euch interessieren, danach macht ihr zwei Bias Frames bei derselben ISO Zahl und noch Flatframes bei ebenfalls derselben ISO Zahl. Mit diesen Daten könnt ihr die Werte entweder selbst berechnen oder z.B. ein PixInsight Script (siehe [She]) ausführen und bekommt die entsprechenden Ergebnisse ausgegeben. Die Daten selbst zu bestimmen ist im Prinzip nicht

schwer, aber würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Deswegen beschränke ich mich hier auf die Ergebnisse des Skripts. Hier mal ein Beispieloutput:

```

DSLRL Sensor Parameters v0.0.6
Camera: Canon EOS 1200D
ISO speed: 1600
Image Size: 5202 x 3465
Bias frames exposure time: 1/4098 sec
Flat frames exposure time: 1/512 sec
Dark frames exposure time: 300 sec
Channel order: []
Gain per channel(e/ADU): [ 0.133, 0.136, 0.135, 0.133 ]
ISO for unit gain: [ 213, 218, 215, 212 ]
Read Noise(e): [ 2.48, 2.58, 2.51, 2.5 ]
Dark Current (e/pixel/sec) [ 0.0477, 0.0548, 0.0492, 0.053 ]
Noise estimates for 300sec exposure Read Noise(e): [ 2.48, 2.58, 2.51, 2.5 ]
Thermal Noise(e): [ 3.78, 4.05, 3.84, 3.99 ]
Mean values in ADU
Bias Frame 1: [2048.7, 2049.9, 2048.5, 2049.6 ]
Bias Frame 2: [2048.9, 2050.3, 2048.4, 2049.7 ]
Flat Frame 1: [3522.2, 3016.7, 2845.3, 3532 ]
Flat Frame 2: [3443.6, 2963, 2807.5, 3453.3 ]
Dark Frame 1: [ 2045.9, 2045.2, 2046.8, 2045.3 ]
Dark Frame 2: [ 2046.7, 2045, 2046.5, 2045.4 ]
DSLRL Sensor Parameters v0.0.6 Completed.

```

Was uns hier insbesondere interessiert ist der Dark Current. Der Dark Current ist eine Abschätzung für das thermische Rauschen (als Varianz der Elektronen) pro Zeit und pro Pixel. Ich habe wieder eine ISO Zahl von 1600 und eine Belichtungszeit von $t = 300sec$ verwendet, wobei die ISO Zahl für den Dark Current egal ist, dieser ist unabhängig von der ISO Zahl. Das Skript gibt uns nun 4 Werte für den Dark Current aus, einen für Rot, zwei für Grün und einen für Blau: Also das Bayer Muster des Sensors. Falls sich die vier Werte zu stark voneinander unterscheiden, überprüft bitte nochmal eure Bilder und Einstellungen, es ist wahrscheinlich etwas falsch. Ihr könnt nun z.B. den arithmetischen Mittelwert aus den vier Werten bestimmen, dieser sollte robust sein:

$$DarkCurrent = \frac{0.0477 + 0.0548 + 0.0492 + 0.053}{4} = 0.0512 \frac{e-}{pix * sec}$$

Schaut man sich nun den Dark Current über der Temperatur an, dann bekommt man ein ähnliches Bild wie das Folgende:

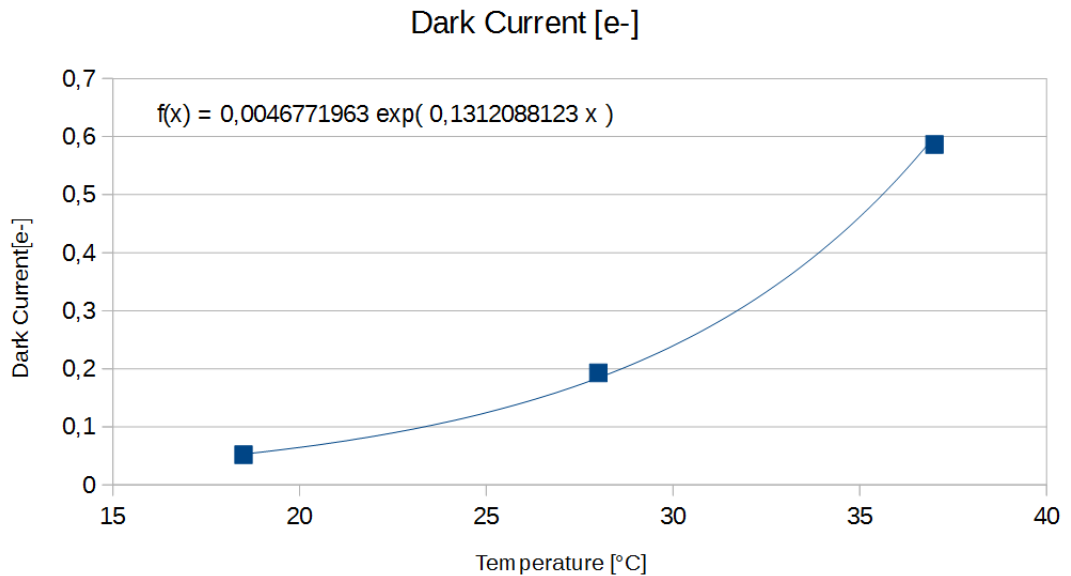


Abbildung 1: Dark Current über der Temperatur, für die Canon EOS 1200D

Nun weiß man von einer Fotodiode (Sensor eines Pixels), dass sich diese Kurve sehr gut durch eine Exponentialfunktion darstellen lässt. Also habe ich den Dunkelstrom durch eine simple Exponentialfunktion approximiert, wobei T die Temperatur in °C ist:

$$DarkCurrent = 0.004677 * e^{0.1312 * T}$$

und wie ihr seht: Das passt das ziemlich gut. Mit dieser Funktion können wir nun das thermische Rauschen dieser Kamera simulieren. Multipliziert man diesen Wert noch mit der Belichtungszeit, dann bekommt man die Varianz in Elektronen. Wie bereits erwähnt ist die Varianz in Elektronen auch genau unser gesuchter Rauschterm.

In unserem Beispiel also:

$$N_{therm} = 0.0512 * 300 = 15.36e-$$

Wenn euch das nicht liegen sollte, so könnt ihr mir auch einfach bei 3 verschiedenen Temperaturen jeweils 2 Dunkelbilder erzeugen, zusätzlich noch 2 Flatframes und 2 Bias Frames und das natürlich alles bei derselben ISO Zahl. Wenn ihr mir die Bilder dann zuschickt, werde ich eure Kamera gerne mit in meiner Datenbank aufnehmen.

1.7 Stacken von Bildern

Das Stacken von Bildern ist sehr simpel zu berechnen. Das Signal verhält sich einfach linear mit der Anzahl der Bilder n , also:

$$S_{stacked} = S_{obj} * n$$

Geht man davon aus, dass für eine Belichtungsreihe immer dieselbe Belichtungszeit verwendet wurde, skaliert alles einfach nur mit der Anzahl der Bilder. Verwendet man verschiedene Belichtungszeiten, muss das natürlich berücksichtigt werden. Wir gehen vom einfachen Fall aus:

1. N_{therm} steigt linear mit der Gesamtbelichtungszeit
2. N_{read} steigt linear mit der Anzahl der gemachten Bilder, also $N_{read} * n$
3. N_{back} steigt linear mit der Gesamtbelichtungszeit
4. N_{obj} steigt linear mit der Gesamtbelichtungszeit

Also alles ziemlich langweilig ^^

Das Signal zu Rauschverhältnis verhält sich dann also folgendermaßen:

$$SNR = \frac{S_{Signal}(t_{gesamt})}{\sqrt{n * N_{read} + N_{Therm}(t_{gesamt}) + N_{Back}(t_{gesamt}) + N_{Obj}(t_{gesamt})}}$$

Im Prinzip müssen wir überall nur die Gesamtbelichtungszeit einsetzen, außer beim Readnoise, da interessiert nur die Anzahl der gemachten Bilder.

2 Bestimmung wichtiger Randdaten der Kamera

2.1 Gain

Den Gain (Formelzeichen G) benötigt man zum umrechnen von ADU in eine Elektronenanzahl. Also konkret, die Umrechnung von einem Pixelwert in die Anzahl an Elektronen. Dieser hängt maßgeblich von der Bit-Anzahl der Kamera ab und natürlich von der ISO Zahl. Die Frage ist natürlich, wo bekomme ich diesen Wert eigentlich her? Auch hier hilft PixInsight wieder und zwar mache man im Automatik Modus der Kamera (allerdings bei fester ISO Zahl) zwei Flatframes hintereinander. Dann erstellt man sich noch ein Bias Frame bei derselben ISO Zahl. Mit diesen 3 Bildern kann ich in PixInsight das Script FlatSNREstimator starten und mir mit den 3 Bildern sofort den Gain bestimmen. Die folgende Tabelle zeigt die Werte für meine Canon. Sehr schön ist, dass die Werte ziemlich linear mit der ISO Zahl korrelieren, was auch genau so sein sollte.

Falls ihr kein Pixinsight habt oder einfach wissen wollt, wie man diese Werte selbst bestimmt:

<http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/fishing-for-photons/signal-to-noise-part-3-measuring-your-camera-r1929>

ISO	gemessener Gain
100	$2.159 \frac{e^-}{ADU}$
400	$0.58 \frac{e^-}{ADU}$
800	$0.291 \frac{e^-}{ADU}$
1600	$0.147 \frac{e^-}{ADU}$

Tabelle 1: Gemessener Gain der Canon EOS 1200D

2.2 Bits pro Pixel

Dieser Wert ist Kameraspezifisch und gibt einfach nur an, wie viele Graustufen ein Pixel unterscheiden kann. Diesen Wert könnt ihr ebenfalls bei <http://sensorgen.info> oder <http://www.dxomark.com/> herausfinden und zwar unter Bits per Pixel. In meinem Fall sind das 14Bit also $B_{sensor} = 2^{14} = 16384$ Graustufen, die ein Pixel unterscheiden kann. Diese Werte werden oft als ADU angegeben, was einfach nur der Wert des Pixels in einem Raw File ist.

2.3 Fläche der Teleskopöffnung

Die Fläche des Pixels $A_{\text{öffnung}}$ in Metern könnt ihr sehr einfach berechnen. Ihr benötigt den Öffnungsradius $r_{\text{öffnung}}$ und den Radius der Obstruktion r_{obstr} (Abschattung durch den Fangspiegel z.B.).

$$A_{\text{öffnung}} = (r_{\text{öffnung}}^2 - r_{\text{obstr}}^2) \pi$$

Nehmen wir mal mein Celestron C6 mit einem Öffnungsdurchmesser von 152mm und einem Obstruktionsdurchmesser von ca. 50mm:

$$A_{\text{öffnung}} = (0.076^2 - 0.025^2) \pi = 0.0161823m^2$$

2.4 Quanteneffizienz des Sensors

Die Quanteneffizienz η gibt an, wie viele von den eintreffenden Photonen auch tatsächlich in Elektronen umgewandelt werden. Diesen Wert könnt ihr bei <http://sensorgen.info> finden unter Q.E. für meine Kamera sind das 37% also $\eta = 0.37$.

Wobei S die Anzahl der Signalelektronen ist und N die Anzahl der Rausch-Elektronen.

2.5 Lichtintensität eines astronomischen Signals

Die Helligkeit eines astronomischen Objekts wird in der Regel ja mit einer scheinbaren Helligkeit angegeben. Für Messier 33 beispielweise wäre die scheinbare Helligkeit bei 5.7 mag. Um jetzt auf die Anzahl der Photonen zu kommen, benötigt man irgendeine Referenz. In Bessel (1979) werden die Photonenflüsse für einige Wellenlängenbereiche angegeben, die Werte beziehen sich auf ein Objekt der scheinbaren Helligkeit 0:

Wellenlängenbereich	Photonenfluss in $\frac{Photonen}{s \cdot m^2}$
sichtbares Licht	$8.79424 * 10^9$
Rotes Band	$1.069684 * 10^{10}$
Infrarot	$7.31595 * 10^9$

Zwischen Lichtintensität I und scheinbarer Helligkeit m besteht folgender Zusammenhang:

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{0.4 * (m_2 - m_1)}$$

$$\frac{8.79424 * 10^9}{I_2} = 10^{0.4 * (m_2 - 0)}$$

$$\frac{8.79424 * 10^9}{10^{(0.4 * m_2)}} = I_2$$

Mit dieser Formel können wir nun abschätzen wie viele Photonen pro Sekunde pro Quadratmeter auftreten. Nehmen wir also nochmal unser M33 Beispiel mit 5.7 mag an:

$$\frac{8.79424 * 10^9}{10^{(0.4 * 5.7)}} = 4.615 * 10^7 \frac{Photonen}{m^2 s}$$

3 Bestimmung des Signal zu Rauschverhältnis in unserem Beispiel

In unserem Beispiel belichten wir die Dreiecksgalaxie für 300sec bei ISO 1600 mit einer Canon EOS 1200D. Der Himmelshintergrund entspricht einem Dorf/Kleinstadt.

Die Grundlegende Formel war ja folgende:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S_{Signal}}{\sigma_{rauschen}}$$

3.1 Signal

Das Signal ist einfach das Signal des beobachteten Objekts aus Kapitel 1.1:

$$S_{Obj} = 8.66e-$$

3.2 Rauschen

Das Rauschen setzt sich aus den Termen $N_{read}, N_{Therm}, N_{Back}, N_{Obj}$ zusammen. Da diese Terme alle Varianzen entsprechen, können diese addiert werden, sofern sie statistisch unabhängig sind. Davon kann man in diesem Fall ausgehen, daher gilt:

$$N_{rauschen} = N_{read} + N_{Therm} + N_{Back} + N_{Obj}$$

Für unsere Formel benötigen wir aber die Standardabweichung $\sigma_{rauschen}$, das ist einfach nur die Wurzel der Summe der Varianzen:

$$SNR = \frac{S_{Obj}}{\sqrt{N_{read} + N_{Therm} + N_{Back} + N_{Obj}}}$$

$$SNR = \frac{8.66}{\sqrt{6.25 + 15.36 + 4.39 + 8.66}}$$

$$SNR = 1.47$$

3.3 Abhängigkeiten der Terme von Temperatur, ISO, Belichtungszeit, Hintergrundhelligkeit, Objekhelligkeit

Spannend ist es, welche Terme von welchen Größen abhängen, fangen wir mit dem Signal an, dieses hängt in unserer Modellierung nur von der Belichtungszeit ab, die Photonenrauschterme für Hintergrund und Objekt selbst ebenfalls nur von der Zeit.

$$S_{Obj}(t, I_{Obj})$$

$$N_{read}(ISO)$$

$$N_{Therm}(ISO, T, t)$$

$$N_{Back}(t, I_{Back})$$

$$N_{Obj}(t, I_{Obj})$$

4 Bestimmung des Dynamikumfangs in unserem Beispiel

Der Dynamikumfang eines Sensorpixels beschreibt das Verhältnis aus dem größtmöglichen Helligkeitswert und dem kleinsten noch meßbaren. Für mehr Informationen und eine wirklich schöne Erklärung des Dynamikumfangs kann ich euch folgende Webseite empfehlen[McH] In unserem Fall wäre der maximale Wert die sogenannte Full-Well Kapazität, welche angibt wieviele Elektronen ein

Pixel aufnehmen kann bis er gesättigt ist. Der minimale Wert ist das Gesamttrauschen des Sensors. Denn hat der Sensor nur sehr wenig Elektronen erzeugt bzw. Photonen eingefangen, verschwinden diese im Rauschen. Beim Gesamttrauschen wird in diesem Fall wirklich nur das Sensorrauschen verwendet, also kein Photonenrauschen !!! Daraus folgt folgende Formel:

$$DR = \log_2 \left(\frac{Q_{fullwell}}{\sqrt{N_{read} + N_{Therm}}} \right)$$

Der Wert $Q_{fullwell}$ beschreibt die Full-Well Kapazität eines Sensors, dieser Wert ist Hardwarespezifisch und kann auf z.B. sensorgen.info für zahlreiche Kameras gefunden werden. Zudem sollte man beachten, dass die Full-Well Kapazität abhängig von der ISO Zahl ist !!! Falls ihr euch fragt, woher der Logarithmus mit der Basis 2 kommt: Dadurch bekommt man den Wert in Stops.

Was sind Stops?

Ganz einfach, ein Stop mehr bedeutet eine Verdopplung der Lichtintensität auf eurem Bild. Es gibt einen sehr schönen Artikel dazu, der das sehr einfach erklärt [NA].

4.1 Wie sieht es nun aus, wenn wir mehrere Bilder stacken?

In diesem Fall ändern sich nur die Rauschtherme (siehe Kapitel 1.7), die Full-Well Kapazität ändert sich nicht, da sie nur vom Sensor abhängt. Also gehen wir von n Bildern beim Stacking aus und einer Gesamtbelichtungszeit von t_{gesamt} , dann folgt:

$$DR(n) = \log_2 \left(\frac{Q_{fullwell}}{\sqrt{n * N_{read} + N_{Therm}(t_{gesamt})}} \right)$$

4.2 Reales Beispiel

Nehmen wir wieder die Canon EOS 1200d bei einer ISO Zahl von 1600 und einer Belichtungszeit von 300sec bei einem Bild, die Rauschtherme bekommen wir aus dem vorherigen Beispiel, $Q_{fullwell} = 1843e-$ (sensorgen):

$$DR(n) = \log_2 \left(\frac{1843}{\sqrt{1 * 6.25 + 15.36}} \right) = 8.631 \text{ stops}$$

Was passiert, wenn wir stattdessen 10x30sec nehmen?

$$DR(n) = \log_2 \left(\frac{1843}{\sqrt{10 * 6.25 + 15.36}} \right) = 7.70 \text{ stops}$$

Ungünstig, denn der Read Noise erhöht sich, wobei die Full-Well Kapazität gleich bleibt. In diesem Fall ist das Stacking also eher kontraproduktiv.

Literatur

- [Cla] CLARK, Roger N.: *Digital Camera Reviews and Sensor Performance Summary*. <http://www.clarkvision.com/>
- [Gul16] GULDE, Norbert: Berechnung des Rauschens fuer einen Pixel. (2016)
- [htt] [HTTP://WWW.SENSORGEN.INFO/](http://WWW.SENSORGEN.INFO/): *DSLR Sensor Data*.
<http://www.sensorgen.info/>
- [Liu02] LIU, Xinqiao: *CMOS image sensors dynamic range and SNR enhancement via statistical signal processing*, stanford university, Diss., 2002
- [McH] MCHUGH, Sean: *Dynamic Range in Digital Photography*.
<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/dynamic-range.htm>
- [NA] NA: *WHAT IS A SSTOPÖF EXPOSURE IN PHOTOGRAPHY?*
<http://www.photographymad.com/pages/view/what-is-a-stop-of-exposure-in-photography>
- [She] SHELLY, Mark: <http://www.cloudynights.com/topic/504543-pixinsight-script-for-calculating-dslr-sensor-characteristics/page-3>.
<http://www.cloudynights.com>