

1. Rauschen

Signal-Rausch-Verhältnis

Das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal/Noise-Ratio) in einem CCD-Sensor oder in einer CCD-Kamera läßt sich darstellen als Verhältnis der Signal-Elektronen zu den Rausch-Elektronen:

$$\frac{S}{N} = \frac{n_{\text{signal}}}{n_{\text{noise}}}$$

(1)

n_{signal} = Anzahl der Signal-Elektronen

n_{noise} = Anzahl der Rausch-Elektronen

Die Anzahl der Signal-Elektronen, abhängig von der Beleuchtungsstärke bzw. von den auftreffenden Photonen, kann folgendermaßen angegeben werden:

$$n_{\text{signal}} = \frac{\varnothing}{h \cdot \nu} \cdot t \cdot A \cdot \eta$$

(2)

\varnothing = Intensität in $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$

$h\nu$ = Photonenenergie [Ws]

t = Belichtungszeit [s]

A = Pixelfläche [m^2]

η = Quantenwirkungsgrad

Rausch-Quellen

Die Anzahl der Rausch-Elektronen kann auf drei Rausch-Quellen verteilt werden:

a) Photonenrauschen

Photonenrauschen ist gleich der Wurzel aus der Anzahl der Signal-Elektronen

b) CCD-Rauschen

Rausch-Elektronen (n_{CCD}), die in den CCD-Kanälen erzeugt werden (Transfer, dark current, fixed pattern noise, ...)

c) Verstärkerrauschen

Rausch-Elektronen (n_{AMP}), die im Ausgangsverstärker erzeugt werden

Da alle 3 Quellen zueinander nicht korreliert sind, gilt:

$$n_{\text{noise}} = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{\varnothing}{h \cdot \nu} \cdot t \cdot A \cdot \eta}^2 + n_{\text{CCD}}^2 + n_{\text{AMP}}^2\right)}$$

(3)

n_{CCD} = Rauschelektronen im CCD

n_{AMP} = Rauschelektronen im Ausgangsverstärker

Setzt man (2) und (3) in (1) ein, folgt:

$$\frac{S}{N} = \frac{\frac{\Phi}{h \cdot \nu} \cdot t \cdot A \cdot \eta}{\sqrt{\frac{\Phi}{h \cdot \nu} \cdot t \cdot A \cdot \eta + n_{\text{CCD}}^2 + n_{\text{AMP}}^2}} \quad (4)$$

Tritt im CCD eine hohe Lichtaussteuerung auf, so dominiert das Photonenrauschen. Vereinfacht gilt:

$$\frac{S}{N} \approx \sqrt{\frac{\Phi}{h \cdot \nu} \cdot t \cdot A \cdot \eta} \approx \sqrt{n_{\text{signal}}}$$

oder $\frac{S}{N}$ ist direkt proportional zur Wurzel des Quantenwirkungsgrades

$$\frac{S}{N} \sim \sqrt{\eta} \quad (5)$$

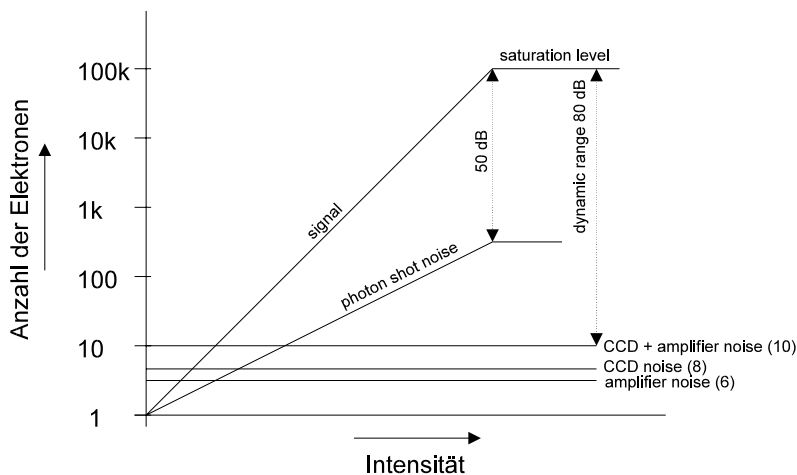
Für geringe Aussteuerung dominiert das Rauschen des CCD's und des Ausleseverstärkers:

$$\frac{S}{N} \sim \frac{\eta}{\sqrt{n_{\text{CCD}}^2 + n_{\text{AMP}}^2}} \quad (6)$$

Zusammenfassung

Für große Aussteuerung im CCD ist das Signal-Rausch-Verhältnis proportional mit der Wurzel des Quantenwirkungsgrades.

Für kleine Signale ist das Verhältnis direkt proportional zum Quantenwirkungsgrad und wird besonders vom Rauschen im CCD und Ausgangsverstärker bestimmt.



Beispiel

CCD-Noise ($8e^-$ RMS)

Amplifier-Noise ($6e^-$ RMS)

CCD + Amplifier-Noise =

$$= \sqrt{8^2 + 6^2} = 10e^- \text{ RMS}$$

2. Smear

„Smear“ ist ein fehlerhaftes Signal, welches im Bild von oben nach unten (vertikal) durch einen hellen Bildbereich läuft. Die Ursache ist bei den üblichen CCD-Typen unterschiedlich:

a) Frame Transfer CCD

Bei „Frame-Transfer-CCDs“ wird Smear erzeugt durch auftreffendes Licht während das generierte Bild von der Belichtungszone in die Speicherzone geschoben wird (frame shift).

b) Interline Transfer CCD

Bei „Interline-Transfer-CCDs“ wird Smear erzeugt durch gestreute Photonen, die in das abgedeckte vertikale Schieberegister eintreten, anstatt in den Photodioden gesammelt zu werden.

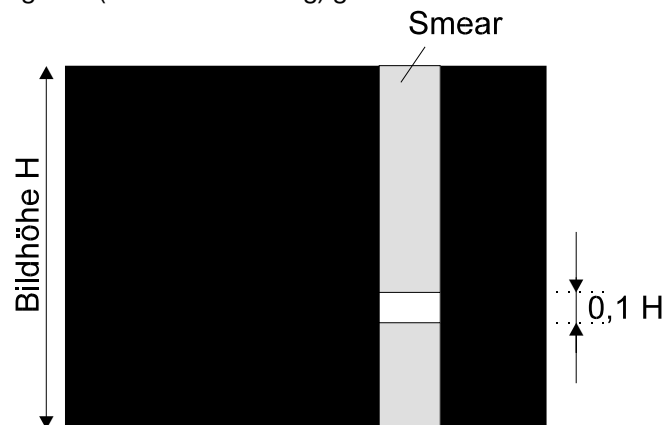
c) MOS-XY Sensoren

MOS-XY Sensoren haben die gleichen Ursachen wie Interline-Transfer-CCD's.

d) CID Sensoren

Bei CID-(Charge-Injection-Device)-Sensoren tritt kein Smear auf.

Zur Messung des Smears wird üblicherweise ein weißes Rechteck (100% Aussteuerung) mit 10% Höhe des Gesamtbildes auf schwarzem Hintergrund (0% Aussteuerung) gewählt.



Für die verschiedenen CCD Typen gilt:

a) Frame Transfer CCD:

Ist t_{int} die Belichtungszeit (integration time) und t_{tr} die Transferzeit (frame shift) von der Belichtungszone in die Speicherzone, so gilt:

$$\text{smear} = \frac{1}{10} \cdot \frac{t_{\text{tr}}}{t_{\text{int}}}$$

(9)

t_{int} = Belichtungszeit [s]

t_{tr} = Transferzeit [s]

Typische Werte für t_{tr} sind ca. 500µsec bei einem Video-CCD.

b) Interline Transfer CCD:

Ist t_{int} die Belichtungszeit und t_{rd} (read) die Auslesezeit des CCD's, so wird der Smear zu:

$$\text{smear} = V_{\text{SM}} \frac{t_{\text{rd}}}{t_{\text{int}}} \quad (10)$$

t_{int} = Belichtungszeit [s]

t_{rd} = Auslesezeit [s] (Video = 20ms)

V_{SM} = vertikaler Smear Faktor
typ: 1/20.000

Beispiel A

Bei 10ms Belichtungszeit und einer Transferzeit von 500 μ s erzeugt ein Frame-Transfer-CCD folgenden Smear:

$$\text{smear} = \frac{1}{10} \cdot \frac{500\mu\text{s}}{10\text{ms}} = 0,5\%$$

Anmerkung:

Dies gilt für den typischen Test bei einem weißen Rechteck (100% Aussteuerung) mit einer Höhe von 10% der Gesamthöhe des Bildes. Oft ist jedoch bei einer realen Abbildung ein heller Fleck mehr als 100% ausgesteuert. Der Smear erhöht sich damit z.B. bei 10facher Überbelichtung (z.B. Glühfaden) insgesamt ebenfalls um das 10fache.

Beispiel B

Ein Interline-Transfer-CCD hat eine Belichtungszeit von 10ms und eine Auslesezeit von 20ms. Wie groß ist der Smear?

$$\text{smear} = \frac{1}{20000} \cdot \frac{20\text{ms}}{10\text{ms}} = 0,01\%$$

Selbst bei einer lokalen Überbelichtung ist der Smear hier vernachlässigbar.

Beispiel C

Anders verhält es sich bei kurzen (Shutter) Belichtungszeiten: Ein Interline-Transfer-CCD hat eine Belichtungszeit von 5 μ s (electronic shutter) und eine Auslesezeit von 20ms. Die Belichtungsquelle leuchtet kontinuierlich.

$$\text{smear} = \frac{1}{20000} \cdot \frac{20\text{ms}}{5\mu\text{s}} = 20\%$$

Abhilfe schafft hier ein zusätzlicher Verschluss in Form eines mechanischen oder elektro-optischen Verschlusses, der während der Auslesezeit den Lichteinfall auf den CCD verhindert. Normalerweise wird eine Blitzlichtquelle verwendet. Damit wird die Auslesezeit quasi verkürzt. Beispielsweise verbessert ein Fotoblitz mit Blitzlänge 1/5000 sec den Smear im obigen Beispiel um den Faktor 100.

3. Blooming und Antiblooming

CCD-Sensoren sind vollkommen unempfindlich gegenüber „burn-in“ und „image-lag“ Effekten wie sie bei analogen Aufnahmeröhren auftreten.

Beim Auslesen des CCD's werden **alle** Informationen ausgelesen, so daß beim nächsten Bild keine Information des letzten Bildes enthalten ist. Wird jedoch an einer Stelle des CCD's zuviel Licht projiziert, so können die davon erzeugten Elektronen in ein Nachbar-Pixel überlaufen. Dieser Effekt wird als „Blooming“ bezeichnet. Verschiedene Vorkehrungen sollen dieses Blooming verhindern:

Horizontal Antiblooming

Ein „antiblooming gate“ wird neben einem Pixel (horizontal) eingebaut. Bei entsprechender Ansteuerung laufen Elektronen nicht in das Nachbarpixel sondern in das durch das „gate“ erzeugte „antiblooming drain“ über. Von Vorteil ist der einfache Aufbau und die effektive Wirkung, nachteilig ist, daß es Platz auf Kosten eines lichtempfindlichen Teils eines Pixels belegt.

Clocked Antiblooming

Getaktetes Antiblooming nützt die Tatsache, daß überlaufende Elektronen mit „Löchern“ rekombinieren können, bevor sie in benachbarte Pixel gelangen. Dieser Vorrat von Löchern wird durch das Takten (z.B. im Zeilenrücklauf, HSYNC) ständig neu aufgefrischt.

Vorteilhaft ist, daß kein lichtempfindlicher Platz verschwendet wird. Von Nachteil sind die komplizierte Ansteuerung mit 3-Clock-Pegeln und die reduzierte Full-Well-Kapazität. Mit modernen CCD's kann bei diesem Verfahren das Blooming bis zu einer 50...100-fachen Überbelichtung verhindert werden.

Vertical Antiblooming

Wie beim horizontalen Antiblooming wird mit einer zusätzlichen Vorrichtung eine Antiblooming-Struktur unterhalb (vertikal) der Photodioden aufgebaut. Vertikale Antiblooming-Strukturen lassen sich für alle CCD-Typen aufbauen, jedoch sind sie relativ komplex und schwierig zu optimieren.

Nachteile:

- Komplexer, schwieriger Aufbau bei der Optimierung eines CCD's.
- Die effektive Tiefe des Silikons, die für die Erzeugung von Elektronen zuständig ist, verkürzt sich. Dies führt zu einer reduzierten Rot- und Infrarotempfindlichkeit.

Vorteile:

- Es wird zusätzlich verhindert, daß Elektronen zu weit diffundieren (diffusion MTF), d.h. die MTF wird verbessert.
- Zusätzlich wird die Dunkelstrom-Erzeugung minimiert.
- Hoher Wirkungsgrad bis zu 10^4 -facher Überbelichtung.
- Die Antiblooming Strukturen sind kompakt unterhalb einer Fotodiode und verschwenden keine lichtempfindliche Stelle.

4. Empfindlichkeit

Bei vielen Kameras wird heute die Empfindlichkeit in Lux angegeben. Dies mag bei einfachen Videokameras oder Überwachungskameras sinnvoll sein, ist aber bei wissenschaftlichen Kameras vollkommen ungeeignet. Eine sinnvolle Angabe in Lux hängt viel zu sehr von verschiedenen Voraussetzungen ab. Dies sind:

- Spektrale Verteilung der Beleuchtung
- Spektrale Empfindlichkeit des Aufnahmesensors
- Verwendete Abbildung, Objektiv
- Erreichbare Aussteuerung
- Verwendeter Meßlaufbau

Die einzig sinnvolle Aufgabe zur exakten Beurteilung eines Aufnahmesensors ist die Angabe der Sensitivität in $\left[\frac{A}{W}\right]$ oder der Quantenwirkungsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge.

Beispiele und Umrechnungsformeln

Umrechnung der Sensitivität in den Quantenwirkungsgrad

$$\eta = S \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda}$$

(11)

$$S = \text{Sensitivität} \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right]$$

$$\eta = \text{Quantenwirkungsgrad}$$

$$h = \text{Plancksches Wirkungsquantum} [6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}]$$

$$c = \text{Lichtgeschwindigkeit} \left[3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$e = \text{Elektronenladung} [1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}]$$

$$\lambda = \text{Wellenlänge [m]}$$

aus (11) folgt mit der Wellenlänge in [μm]:

$$\eta = 1,24 \frac{\text{S}}{\lambda}$$

(12)

Umrechnung von Lux in Photonenfluß

Die Beleuchtungsstärke E in Lux läßt sich über die spektrale Hellempfindlichkeit des Auges in einen Photonenfluß umrechnen. Diese Augenempfindlichkeit hat bei 555nm (grün) ihr Maximum.

Spektrale Hellempfindlichkeit des Auges $V_{[\lambda]}$:

$\lambda_{[\text{nm}]}$	$V_{[\lambda]}$	$\lambda_{[\text{nm}]}$	$V_{[\lambda]}$	$\lambda_{[\text{nm}]}$	$V_{[\lambda]}$
400	0,0004	530	0,862	650	0,107
410	0,0012	540	0,954	660	0,061
420	0,0040	550	0,995	670	0,032
430	0,0116	555	1,000	680	0,017
440	0,023	560	0,995	690	0,0082
450	0,035	570	0,952	700	0,0041
460	0,060	580	0,870	710	0,0021
470	0,091	590	0,757	720	0,00105
480	0,139	600	0,631	730	0,00052
490	0,208	610	0,503	740	0,00025
500	0,323	620	0,381	750	0,00012
510	0,503	630	0,265	760	0,00006
520	0,710	640	0,175		

Wird eine bestimmte Strahlungsmenge physiologisch bewertet, so hängt sie entscheidend vom spektralen Verlauf ab. Wird grünes Licht von 555nm auf eine Fläche von 1m² geworfen, so wird diese als Beleuchtungsstärke von 680 Lux empfunden. Dagegen wird die Intensität im Roten (750nm) nur als 0,1 Lux wahrgenommen. Dies wird im Strahlungsequivalent K ausgedrückt:

$$K = 680 \text{ Lux} \frac{\text{m}^2}{\text{W}} \quad (13)$$

$$E = K \cdot V_{(\lambda)} \cdot \varnothing \quad (14)$$

E = Beleuchtungsstärke [Lux]

\varnothing = Intensität $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

$V_{(\lambda)}$ = Hellempfindlichkeit
des Auges

K = Strahlungs-
equivalent $\left[\frac{\text{Lux} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right]$

Die Intensität des Lichts ergibt sich aus der Anzahl der eintreffenden Photonen mit der Energie $h \cdot \nu$ auf eine Fläche A in einem Zeitintervall t_{int} :

$$\varnothing = \frac{n \cdot h \cdot \nu}{A \cdot t_{\text{int}}} = n \cdot \frac{h \cdot c}{A \cdot \lambda \cdot t_{\text{int}}} \quad (15)$$

λ = Wellenlänge [m]

A = Pixelfläche [m²]

t_{int} = Zeitintervall [s]

h = Plancksches
Wirkungsquantum [Js]

c = Lichtgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

setzt man (13) und (14) in (15) ein, ergibt sich:

$$n = \frac{A \cdot \lambda \cdot t_{\text{int}}}{h \cdot c \cdot K \cdot V_{(\lambda)}} \cdot E \quad (16)$$

λ = Wellenlänge [m]

A = Pixelfläche [m²]

t_{int} = Zeitintervall [s]

h = Plancksches
Wirkungsquantum [Ws²]

c = Lichtgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Beispiel A

Ein Photon mit der Wellenlänge $\lambda = 555\text{nm}$ fällt auf ein Pixel mit $10 \times 10 \mu\text{m}$ bei einer Integrationszeit $t_{\text{int}} = 20\text{ms}$.
Welcher Beleuchtungsstärke entspricht dies?

$$E = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-5} \cdot 10^{-5} \cdot 555 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}$$

$$E = 122 \mu\text{lux}$$

Beispiel B

Wieviel Photonen werden bei unterschiedlichen Wellenlängen mit 1mlux Beleuchtungsstärke in einen Pixel $10 \times 10 \mu\text{m}$ bei 40ms Belichtungszeit erzeugt?

λ [nm]	n [Photonen]
400	29400
450	380
500	46
555	16
600	28
650	180
700	5000
750	186000

Beispiel C

Mit einer Kamera und einem Objektiv mit Blende 2,0 wird bei einer Abbildung aus dem Unendlichen eine beleuchtete Fläche (1 Lux) betrachtet, die mit monochromatischem Licht ($\lambda=600\text{nm}$) angestrahlt wird. Der CCD hat eine Pixelgröße von $10 \times 10 \mu\text{m}$. Der Quantenwirkungsgrad des CCD's bei 600nm beträgt 20% . Welche Belichtungszeit muß gewählt werden, damit ein S/N-Ratio von 100 erzeugt wird?

Unter Vernachlässigung des Ausleserausens des CCD's müssen in einem Pixel

$$\text{Anzahl der Photoelektronen} = (S/N)^2 = 10000$$

erzeugt werden. Dazu werden

$$n_{\text{Photonen}} = \frac{10000}{\eta} = 50000 \text{ Photonen}$$

in einem Pixel benötigt. Ein Objektiv mit Blende 2,0 hat einen Wirkungsgrad von $1/16$ bei einer Abbildung aus dem Unendlichen.

$$t_{\text{int}} = 16 \cdot \frac{680 \cdot V_{(\lambda)} \cdot n \cdot h \cdot c}{E \cdot A \cdot \lambda} = 1,1\text{s}$$

5. Vergleich der CCD-Technologien

	Interline Transfer CCD	Frame Transfer CCD
QE spectral response blue	+	-, ++ ¹⁾
QE spectral response red	-	+, ++ ¹⁾
geometric resolution	+	++
anti blooming	+	-
smear	+	-
electronic shutter	++	--
multiple exposure	++	--
full well capacity	+	++
pixel errors	+	-
non uniformity	+	-
fast read out	+	-
price	+	-, -- ¹⁾

-- worst

- bad

+ good

++ excellent

¹⁾ back illuminated