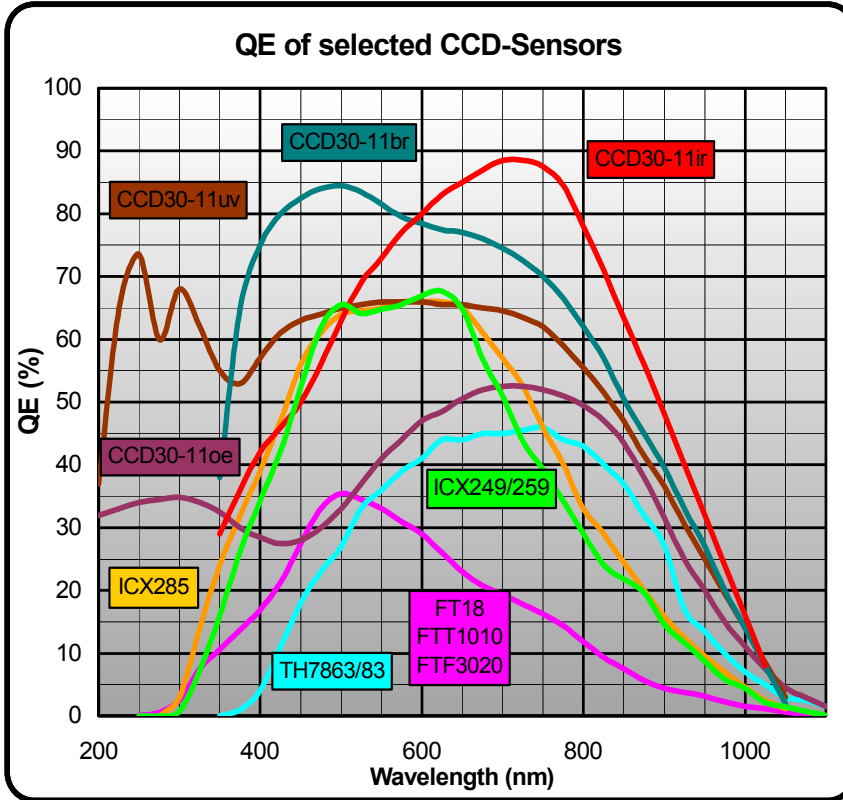


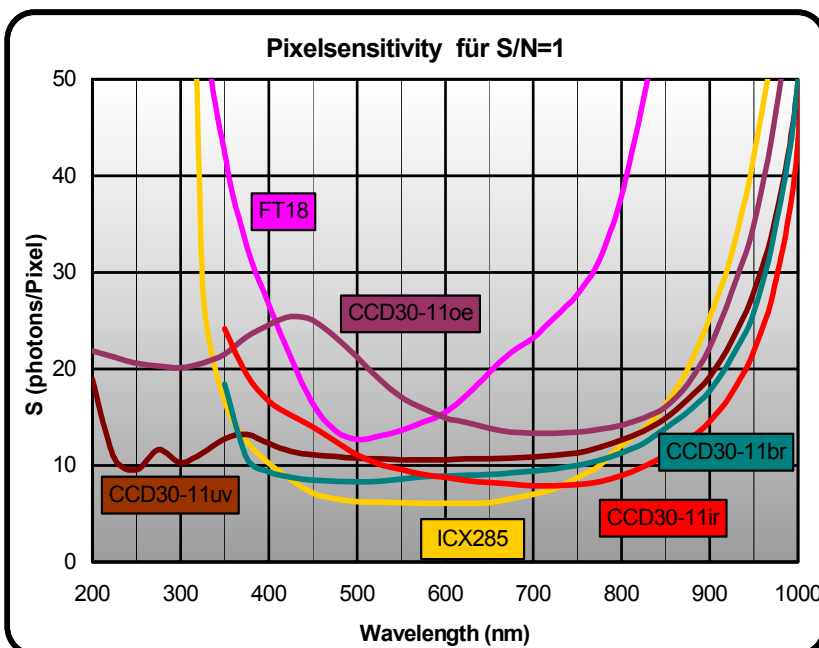
Quantenausbeute QE



Die Quantenausbeute QE ist definiert als das Maß, das den prozentualen Anteil der aus den einfallenden Photonen gebildeten elektronischen Ladungen angibt. Sie gibt also die Effizienz des CCD-Bildsensors an und ist durch seine Materialeigenschaften, sein Herstellungs-Verfahren und seine Design-Struktur bestimmt.

Im linken Diagramm sind die Wellenlängen-Abhängigkeiten der Quantenausbeute der verschiedenen Sensoren dargestellt, um im Vergleich die Selektion für die einzelnen Applikationen zu erleichtern.

Sensitivität



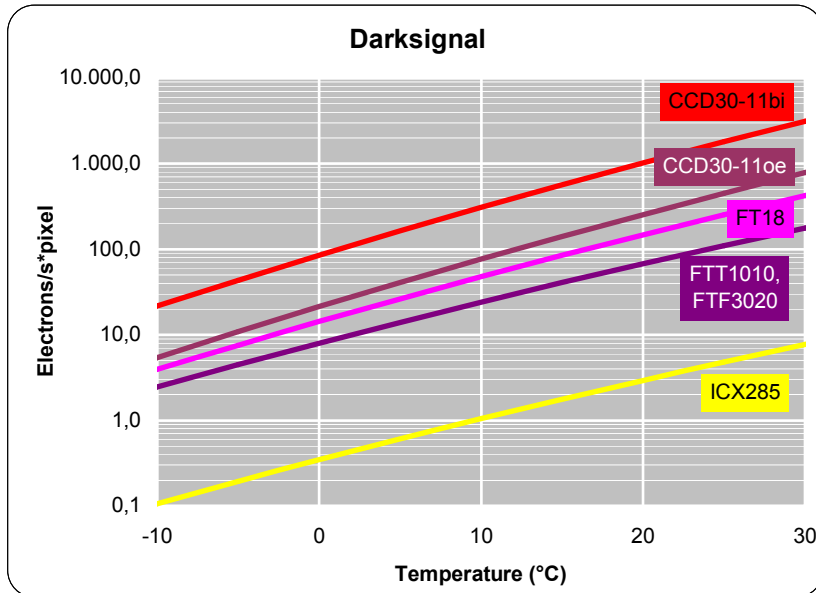
Die Sensitivität S ist ein Maß für die Empfindlichkeit eines Sensors. Die Sensitivität ist das Verhältnis von Signal/Rauschverhältnis SNR und Quantenausbeute QE:

$$S = \text{SNR}/\text{QE}$$

Sie gibt also an, wie viele Photonen zur Erzeugung eines Signals notwendig sind, das einem Signal/Rauschverhältnis von SNR=1 entspricht.

Das nebenstehende Diagramm zeigt die Sensitivität in Abhängigkeit von der Wellenlänge für verschiedene CCD- Bildsensoren.

Dunkelstrom



Der Dunkelstrom eines CCD-Bildsensors ist ein wichtiger Faktor, welcher die Sensitivität stark mitbestimmt.

Er resultiert aus der thermischen Genese von Elektronen mit seiner Temperaturabhängigkeit und folgt mit guter Näherung einem klar exponentiellen Verhalten. Als mittlerer Richtwert kann eine Verdoppelung des Dunkelstromes durch eine Temperaturerhöhung von etwa 6°C bis hin zu 9°C zur überschlagsmäßigen Abschätzung angenommen werden, wie es das nebenstehende Diagramm zeigt. Es addiert sich zum Nutzsignal. Seine statistischen Eigenschaften tragen als Dunkelrauschen zum Gesamtrauschen bei. Abweichend vom Idealfall sind die Dunkelsignale aber nicht gleichmäßig über das Array der einzelnen Bildpunkte verteilt, sondern variieren infolge von Inhomogenitäten während der Chipherstellung örtlich über der Sensorfläche, so dass ein strukturiertes

Dunkelbild entsteht, welches man als „fixed pattern noise“ bezeichnet. Teilweise treten sogar sogenannte „Hot pixel“ als sehr starke Dunkelabweichungen einzelner Pixel auf. Diese feste Dunkelstruktur kann durch Subtraktion eines Dunkelbildes vom Nutzbild korrigiert werden.

Sättigungsladung (Full Well Capacity)

Die Sättigungsladung FW ist die maximale Anzahl Elektronen, die ein einzelnes Pixel unterhalb der Sättigungsbelichtung aufnehmen kann. Die FW ist im Wesentlichen abhängig von der Art des Bildsensors, seiner Betriebsweise und von der Größe der Pixel. Wird die Sättigungsladung überschritten, laufen bei konventionellen Bildsensoren die überschüssigen Elektronen in die Potentialtöpfe der benachbarten Pixel über und es entsteht das sogenannte „Blooming“. Dieser Effekt beeinflusst damit die qualitativen und quantitativen Bildeigenschaften.

Bildsensoren mit einer sogenannten „Antiblooming-Struktur“ leiten die überschüssigen Elektronen nicht zu den benachbarten Bildpunkten ab, sondern zu speziellen Drainagestrukturen. Da diese Strukturen jedoch Platz auf dem Chip benötigen, wird dadurch die Quantenausbeute oder der Füllfaktor negativ beeinflusst.

Häufig ist diese Antibloomingfähigkeit jedoch sehr wichtig, z.B. bei der Vermessung kleiner Intensitäten in der Nachbarschaft von Intensitäten, die mehrere Größenordnungen größer sind.

Antiblooming-Sensoren können Elektronenkapazitäten größer als die 200 bis 1000-fache Sättigungsladung ableiten.

Gesamte Elektronenkapazität (Total electron capacity, TEC)

Die gesamte Elektronenkapazität TEC eines CCD-Bildsensors ist das Produkt aus Sättigungsladung und Gesamtzahl der Pixel. Sie ist ein gutes Maß beim Vergleich von verschiedenen Bildsensoren mit Berücksichtigung der Gesamtzahl der Rauschelektronen TNE (siehe dort). Die Gesamtdynamik einer CCD-Kamera erhält man als das Verhältnis von TEC und TNE.

Gesamtzahl der Rauschelektronen (Total noise electrons, TNE)

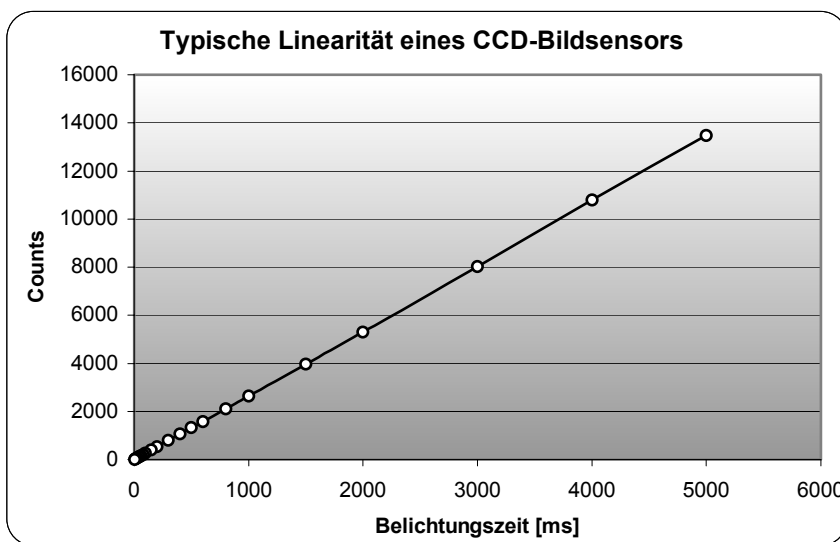
Die Gesamtzahl der Rauschelektronen TNE eines CCD-Bildsensors ist das Produkt aus Rauschelektronen und Gesamtzahl der Elektronen. In Verbindung mit der gesamten Elektronenkapazität TEC (siehe dort) erhält man die Gesamtdynamik einer CCD-Kamera.

Füllfaktor

Der Füllfaktor gibt den für die Konversion der einfallenden Photonen wirksamen Flächenanteil eines Pixels an und ist damit ein wesentliches Merkmal eines CCD-Bildsensors.

Bei Bildsensoren mit einem Füllfaktor kleiner als 100% entstehen entsprechend der räumlichen Abtasteigenschaften Moire-Strukturen, welche die Modulationsübertragungsfunktion beeinflussen und teilweise eine quantitative Auswertung der Bildsignale verhindern. Weiterhin wird die effektive Quantenausbeute in demselben Maße verringert. Diese Verringerung der effektiven sensitiven Fläche wird durch Linsenstrukturen über den einzelnen Pixeln direkt auf der CCD-Sensoroberfläche wesentlich vermindert. Jedoch entsteht hierdurch eine Richtungsabhängigkeit bezüglich der einfallenden Strahlung, die effektive Quantenausbeute nimmt um so stärker ab, je größer der Einfallswinkel ist, was bei optischen Systemen (wie z.B. Objektiven) mit größer werdenden Öffnungszahl zur Erhöhung der Sensitivität, sehr starke Einflüsse hat.

Linearität, Lin



Ein wichtiges Kriterium für die photometrische Applikation eines optischen Mess-Systems ist seine Linearität. Das digitalisierte Messsignal soll möglichst proportional zur Intensität des einfallenden Lichtes sein. Als Linearität kann die prozentuale Abweichung vom linearen Fit eines Linearitätsplots bezogen auf die Sättigungbelichtung definiert werden, also:

$$\text{Lin (\%)} = \frac{(\text{Abweichung} \times 100)}{\text{Sättigungbelichtung}}$$

Die Linearität hängt ab vom Bildsensor selbst, von der Signalverarbeitungselektronik und natürlich auch von den Eigenschaften des Analog/Digitalwandlers (A/D).

Eine typische Linearitätskurve ist im obenstehenden Diagramm gezeigt. Im Allgemeinen sind die Linearitätsabweichungen kleiner als einige zehntel Prozent. Da die Nichtlinearität für ein System weitgehend konstant ist, kann diese mittels einer Eichmessung bis in den Promillebereich verbessert werden. Als Eichfunktion eignet sich der User-Operator der WinSIS-Bildverarbeitungssoftware, der die Intensitätsabweichungen in einfacher Weise als Lookup Tabelle abspeichert und somit eine äußerst schnelle Korrektur gestattet.



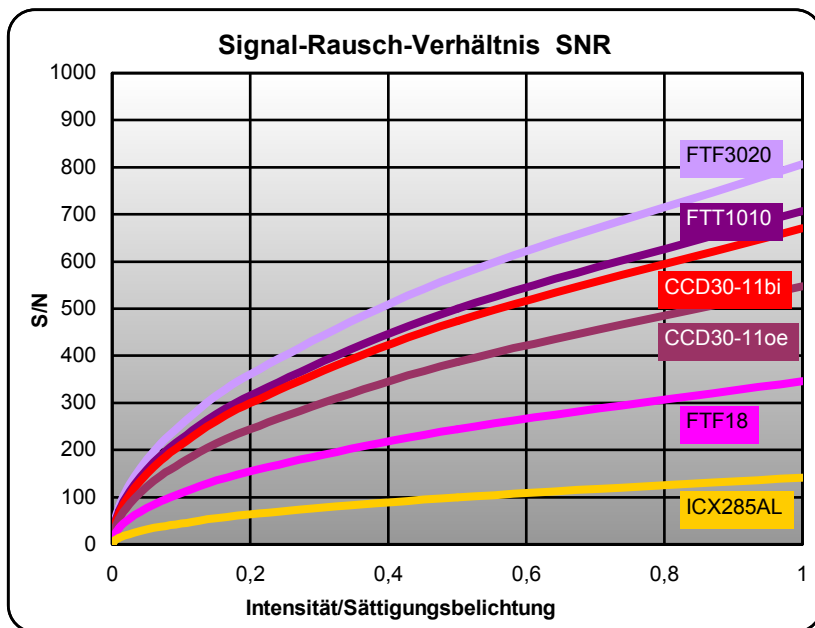
Dynamischer Bereich

Der dynamische Bereich einer Kamera ist definiert als das Verhältnis von Sättigungsbelichtung zu Kamerarauschen. Sie ist eine wichtige Größe zur Kennzeichnung der Kameraperformance, da sie ein Maß zur Quantifizierung von kleinen Intensitäten relativ zu großen Intensitäten ist, also quasi den Intensitätsmessbereich innerhalb einer Bildaufnahme angibt.

THETA SYSTEM verwendet für seine Kameras Digitalisierungen von 14-Bit (Ausleseraten: 3MHz und 10MHz) sowie 18(16)-Bit (1MHz Ausleserate), die ohne die Notwendigkeit der Einführung verschiedener Detektionsbetriebsarten mit verschiedenen analogen Signalverstärkungsfaktoren die optimalen Anpassungen an die verschiedenen CCD-Bildsensorspezifikationen erlauben.

Hierbei ist auch eine höhere Digitalisierungsdynamik relativ zur erreichbaren CCD-Bildsensordynamik sinnvoll. Mit einer Signalmittelung durch Bildakkumulation kann die Gesamtdynamik des A/D-Wandlers voll ausgenutzt werden und man ist nicht auf etwa 13-Bit bei Einsatz eines 12-Bit A/D-Wandlers beschränkt. Mit unserem 18-Bit A/D-Wandler erreicht man bei einer Ausleserate von 1 MHz durch Akkumulation eine Dynamik bis zu 19-Bit.

Signal/Rausch Abstand, SNR



Die Lichtempfindlichkeit ist ein wesentliches Merkmal eines Kamerasystems. Sie kann als die minimale Lichtmenge angegeben werden, welche ein nutzbares Bildsignal ergibt, definiert bei einem Signal/Rausch-Abstand SNR=1, wenn also das Nutzsignal gleich dem Rauschsignal ist.

Der Signal/Rauschabstand SNR (Signal to Noise Ratio) ist abhängig von:

- ▶ dem naturbedingten Photonen-rauschen gleich der Quadratwurzel der Signalintensität I_s
- ▶ dem thermischen Rauschen des Dunkelstromes I_D
- ▶ dem Ausleserauschen A , das vom CCD-Sensor und der Verarbeitung-Elektronik herrührt.

Der formelmäßige Zusammenhang ist: $SNR = I_s / \text{Sqr}(I_s + I_D + A^2)$.

Das Diagramm zeigt typische Abhängigkeiten der Kamerasysteme. Bei hohen Intensitäten – wie sie typischerweise bei Absorptionsmessungen, bei Lichtverteilungsmessungen in Strahlprofilen oder in der Hellfeldmikroskopie etc. auftreten – ist nur das Photonenrauschen relevant und man selektiert für diese Applikationen einen Sensor mit einer hohen Sättigungsbelichtung. Bei kleinen Intensitäten überwiegen das Ausleserauschen und das Dunkelrauschen, so dass zur Auswahl die Quantenausbeute des Bildsensors und das Rauschen der Kamera maßgebend sind.

Binning

Binning nennt man das Zusammenfassen von Intensitäten benachbarter Bildelemente. Beim Binning wird die Ortsauflösung entsprechend der Anzahl der zusammengefassten Pixel reduziert.

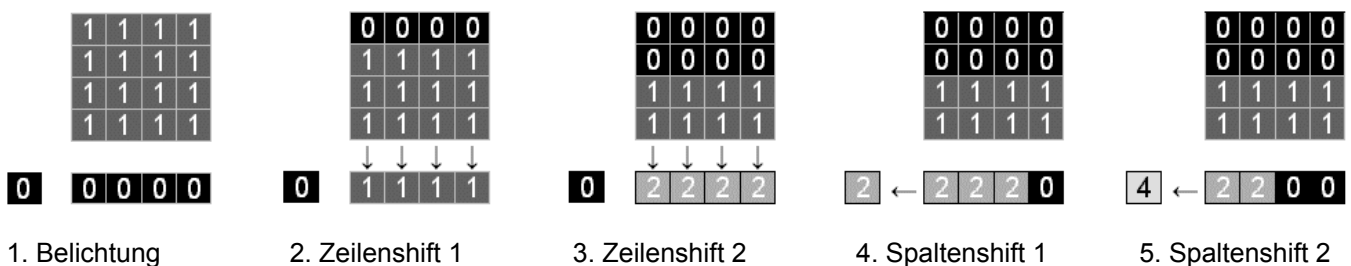
Man unterscheidet zwischen Software-Binning und Hardware-Binning, wobei jede dieser Arten Vor- und Nachteile hat. Das Hardware-Binning wird direkt auf dem CCD-Bildsensor durch Zusammenfassen der gebildeten Ladungsträger mehrerer Bildpunkte beim Bildauslesen durchgeführt, indem man beim Zeilen-Binning die Ladungen mehrerer Zeilen in das Ausleseregister schiebt, bevor man sie zur Ausgangsstufe transferiert, bzw. beim Spalten-Binning die Ladungen mehrerer Zellen des Ausleseregisters in die Ausgangsstufe schiebt, bevor man sie ausliest.

Da man diese zusammengefassten Ladungen nur einmal auslesen muss, entsteht für die Gesamtintensität mehrerer Pixel nur einmal das Ausleserauschen und man erreicht einen entsprechend der gebinnten Pixelzahl höheren Signal/Rauschabstand (siehe dort).

Das Hardware-Binning ist also bei kleinen Intensitäten sinnvoll, wenn man eine reduzierte Bildauflösung tolerieren kann. Zu beachten sind die maximalen Sättigungskapazitäten des Ausleseregisters und der Ausgangsstufe, die im Allgemeinen nicht die vollen gebinnten Ladungsmengen verarbeiten können, so dass bei hohen Intensitäten Blooming auftreten kann. Das Software-Binning erfolgt nach der Bildaufnahme durch Addition der Intensitäten benachbarter Bildpunkte im Bildspeicher. Software-Binning ist immer dann empfohlen, wenn durch Addition der Intensitäten das Photonenrauschen bei mittleren und höheren Intensitäten (Photometrie, Hellfeldmikroskopie, Strahlprofilvermessung etc.) vermindert werden soll, was man im SNR-Diagramm analysieren kann. Man erhöht die Messgenauigkeit um die Quadratwurzel der Anzahl der gebinnten Pixel.

Beim Hardware-Binning wird die Auslesezeit entsprechend der verringerten Anzahl der auszulesenden Zeilen verkürzt, was zu einer höheren Messfrequenz führt. Bei zeitabhängigen Bildsequenzen kann man oft durch geschickte Wahl einer Kombination von Binningfaktoren einen guten Kompromiss zwischen Ortsauflösung und Zeitauflösung finden.

Schematischer Beispiel-Zyklus des 2x2 Hardware-Binnings einer 4x4 CCD-Matrix:



Nach Belichtung der einzelnen Pixel der CCD-Matrix mit der relativen Intensität 1 werden die Ladungen mit dem anschließenden Transfer in die Speicherzone transportiert. Zu Beginn des Auslesens werden nun mit dem Zeilenshift 1 die Ladungen aller Zeilen um eine Zeile in Richtung des Ausleseregisters geschoben, wobei sich die Ladungen der untersten Zeile nun im Ausleseregister befinden (In der obersten Zeile sind nun keine Ladungen mehr). Mit dem analog ablaufenden Zeilenshift 2 werden die nun in das Ausleseregister transferierten Ladungen und die vorher dort schon vorhandenen zur Intensität 2 addiert. Ein ähnlicher Transfer transportiert die Ladungen mit dem Spaltenshift 1 und dem Spaltenshift 2 vom Ausleseregister in die Ausgangsstufe. Nach dem Auslesen der Ladung mit der Intensität 4 aus der Ausgangsstufe zur Verarbeitungselektronik wird die Ausgangsstufe gelöscht, die nächsten beiden Zellen des Ausleseregisters werden analog ausgelesen und so weiter.