

## DIE GROSSE WIRKUNG DES QUANTENWIRKUNGSGRADS

## Das neutrale Maß für Empfindlichkeit

Wie „echt“ das Abbild der Wirklichkeit ist, das ein Bildsensor aufzeichnet, ist unter Filmern, Fotografen und Kameraanwendern oftmals eine Frage des subjektiven Geschmacks. In der industriellen Messtechnik und der Qualitätssicherung ist dies jedoch ein Qualitätsmerkmal, das durch verschiedene Kennzahlen beschrieben wird. Auflösung und Lichtempfindlichkeit eines Chips erhalten oft die meiste Aufmerksamkeit, etwas im Abseits steht dagegen der Quantenwirkungsgrad.

Der Quantenwirkungsgrad (QE) beschreibt das Verhältnis zwischen den auf einen Bildwandler auftreffenden Photonen und der daraus entstehenden Ladung. Bild 1 zeigt den Quantenwirkungsgrad als Kurve in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts. Im Optimalfall bewirkt jedes Photon die Umsetzung in genau einen Ladungsträger. In diesem Fall würde der Quantenwirkungsgrad bei 100 Prozent liegen. Als Formel für einen Bildsensor ausgedrückt:

$$QE = \frac{\text{Generierte Ladungsträger, Elektronen}}{\text{einfallende Photonen}}$$

Dieser theoretische Idealfall wird in der Praxis jedoch nicht erreicht. Verschiedene Faktoren verringern den Quantenwirkungsgrad. Dennoch ist es das Ziel eines Systems aus Bildsensor und Kamera, einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Daher gilt es, alle störenden Bedingungen zu beachten und deren Auswirkungen weitgehend zu minimieren.

### Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad

Da wären beispielsweise die Reflexion des Lichts an der Halbleiteroberfläche sowie die Transmissionsverluste durch die verschiedenen Glaskörper der Optik. Das gilt für die Objektive einer Kamera, im Falle von Bildwandlern aber auch für die Mikrolinsen, die auf den einzelnen Pixeln der Chips sitzen, und die Deckgläser der Bildsensoren. Die Mikrolinsen bündeln das Licht, um es auf den lichtempfindlichen Teil des jeweiligen Pixels zu lenken (Bild 2). Neben diesem Bereich werden nämlich auch Abschnitte des Pixels für Transistoren, Zuleitungen, Kondensatoren oder Register ge-

nutzt. Das Verhältnis dieser lichtempfindlichen Fläche zur Gesamtfläche eines Pixels wird Füllfaktor (fill factor) genannt. Um den Füllfaktor möglichst hoch zu halten und damit die optimale Lichtausbeute zu erreichen, setzt man auf optimierte Vergütungen, Position und Form der Mikrolinsen.

Ein weiterer Faktor ist die Dicke der fotosensitiven Region, in die das Licht eindringt. Diesbezüglich besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der auftreffenden Wellenlänge des Lichts, der Eindringtiefe des Photons und dessen Absorption in der Siliziumschicht (Bild 3). Je größer die Wellenlänge, desto höher ist die Eindringtiefe und desto geringer der Absorptionskoeffizient. Im schlechtesten Fall würde also ein Photon mit hoher Wellenlänge komplett durch das lichtempfindliche Volumen dringen, ohne absorbiert zu werden. In diesem Fall würde es auch keine Ladung generieren. Nahes Infrarotlicht, das auch in der Messtechnik eine Rolle spielt, hat aus diesem Grund eine besonders hohe Eindringtiefe, da es einen Wellenlängenbereich von 780 Nanometer bis 3 Mikrometer abdeckt.

Herstellern von Bildsensoren oder Gesamtkamerasystemen muss also daran gelegen sein, mit ihren Produkten einen möglichst hohen Quantenwirkungsgrad zu erreichen. Doch dies sollte natürlich auch nachvollziehbar, sprich messbar sein. Erschwert wird dieses Unterfangen jedoch durch eines: Es lässt sich nicht direkt messen, wie viele Ladungsträger erzeugt werden, sondern lediglich, was der Bildsensor für ein Ergebnis liefert. Genau hier setzt die Messung des Quantenwirkungsgrads an.

### Messung mit Photonentransferkurve

Was zählt, ist das, was hinten herauskommt: Diese Erkenntnis ist zwar nicht neu, aber dadurch nicht minder richtig. Auch wenn Reflexionseigenschaften, Siliziumdicke oder sonstige Faktoren den Quantenwirkungsgrad beeinflussen, am Ende soll das Ergebnis möglichst genau sein. Bezogen auf die Messung des Quantenwirkungsgrads könnte man auch sagen: Was sich zählen lässt, ist das, was hinten rauskommt, nämlich das durch die Elektronen generierte digitale Signal. »

© qz – Qualität und Zuverlässigkeit

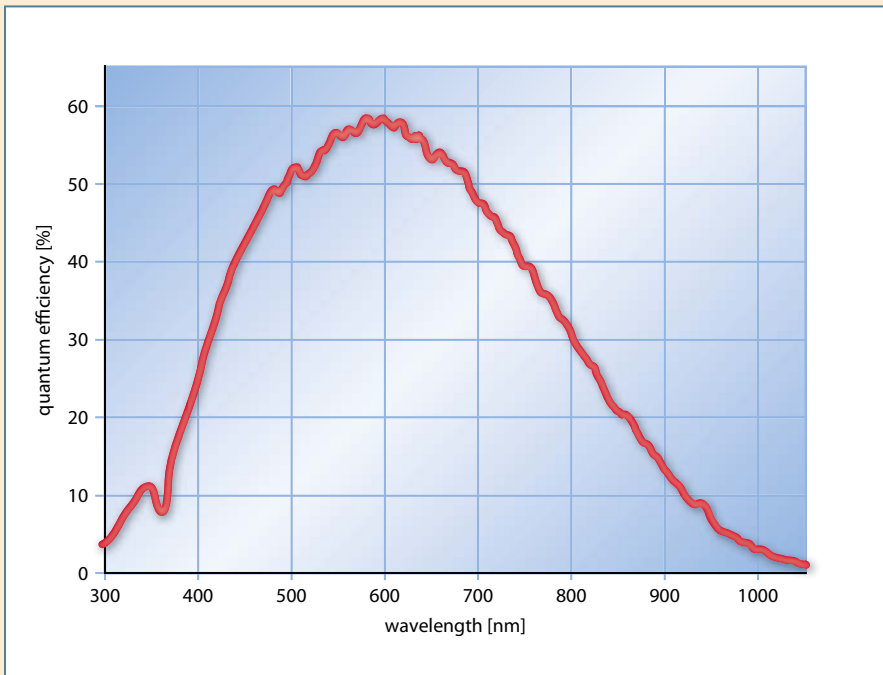


Bild 1. In Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts ergibt sich eine Kurve des Quantenwirkungsgrads für einen PCO.edge-5.5-sCMOS-Chip.

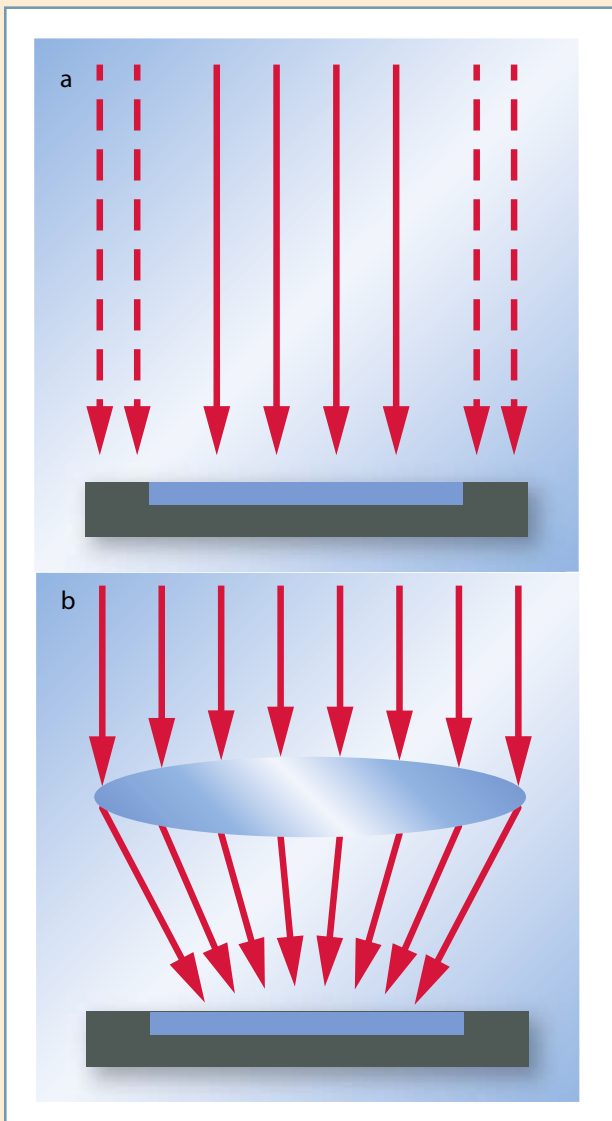


Bild 2. Für maximale Lichtausbeute muss einfallendes Licht auf die fotosensitive Chipfläche geleitet werden. Ohne Mikrolinsen fällt ein Teil des Lichts neben diese Fläche und geht so verloren (a). Mikrolinsen auf den einzelnen Pixeln bündeln es wie eine Kameraoptik und leiten auch die Photonen aus den Randbereichen auf die Fotodiode (b).

© qz – Qualität und Zuverlässigkeit

**Literatur**

- 1 Janesick, J.R.: CCD characterization using the photon transfer technique. In: Prettyjohns, K.; Derenlak, E. (Hrsg.), Solid State Imaging Arrays, Vol. 570 der SPIE Proc., S. 7-19, 1985
- 2 [http://www.emva.org/cms/upload/Standards/Standard\\_1288/EMVA1288-3.0.pdf](http://www.emva.org/cms/upload/Standards/Standard_1288/EMVA1288-3.0.pdf) (letzter Zugriff: 7.7.2014)

**Formelschwäche inklusive**

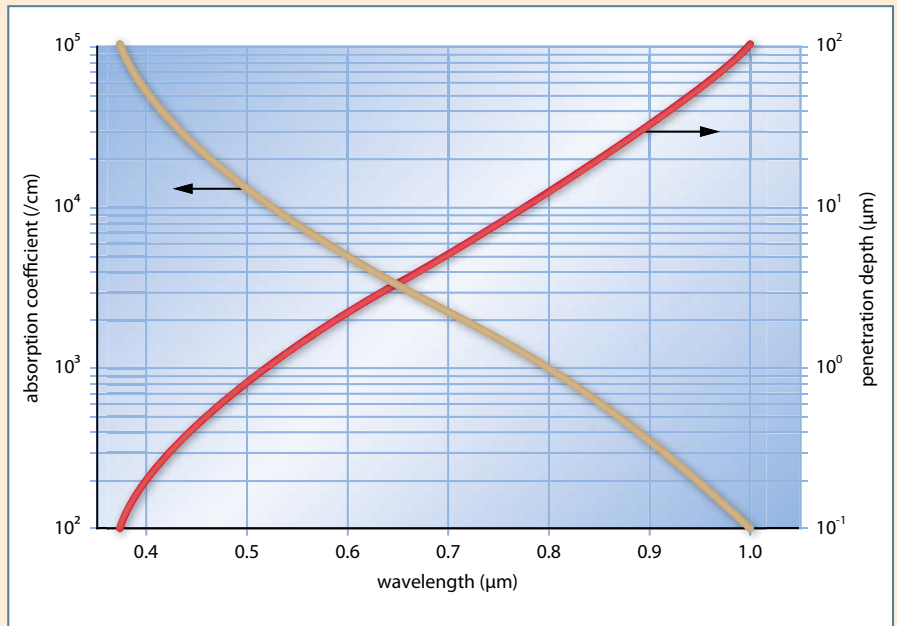
Die Formel des Quantenwirkungsgrads legt nahe, dass der maximale Wirkungsgrad bei 100 Prozent liegt. Das ist für den sichtbaren Bereich des Lichts auch richtig, dennoch besteht in der Praxis die Möglichkeit, dass man Werte darüber erreichen kann. Dann nämlich, wenn die Wellenlänge des einfallenden Lichts unterhalb von ca. 250 Nanometern liegt, also bereits in den tiefen UV-Bereich hineinreicht.

Hierbei kann es sein, dass ein Photon gleich zwei Ladungsträger erzeugt und somit den Wirkungsgrad verdoppeln würde. Dies ist bislang im EMVA-1288-Standard noch nicht berücksichtigt, jedoch arbeitet die Arbeitsgruppe daran, auch diesen Teil des Spektrums zu berücksichtigen. Was aber dennoch nichts daran ändert, dass der Quantenwirkungsgrad der ideale Parameter ist, um die Empfindlichkeit von Bildsensoren zu beschreiben.

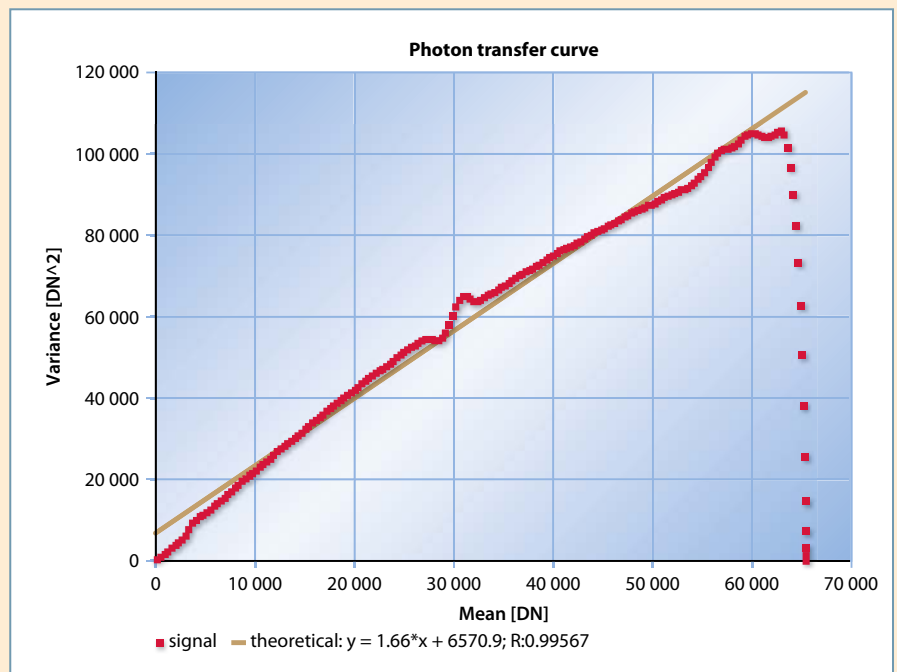
**QZ-Archiv**

Diesen Beitrag finden Sie online: [www.qz-online.de/880999](http://www.qz-online.de/880999)

Für diese Rechnung ist jedoch auch das wichtig, was vorne hineingeht, nämlich das Licht bzw. die Photonen. Um deren Zahl zu bestimmen, wird die Lichtmenge, die auf eine homogen ausgeleuchtete Fläche trifft – beispielsweise am Ausgang einer Ulbricht-Kugel –, zunächst von einem kalibrierten Fotodetektor gemessen. An die



**Bild 3.** Absorptionskoeffizient von Silizium zusammen mit der korrespondierenden Eindringtiefe als eine Funktion der Wellenlänge des einfallenden Lichts (Quelle: „Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices“, Albert J.P. Theuwissen)



**Bild 4.** Ein zentrales Element bei der Bestimmung des Quantenwirkungsgrads ist die Varianz im Verhältnis zum mittleren Signal, auch Konversionsfaktor genannt. Nur mit ihm lässt sich von dem gemessenen digitalen Signal auf die Elektronen schließen.

Stelle des Fotodetektors kommt danach der zu messende Bildsensor oder die Kamera mit Sensor. Damit lässt sich das digitale Signal messen, die sogenannten „counts“. Diese werden von den durch die Photonen freigesetzten Elektronen erzeugt. Auf ihrem Weg durch den Bildwandler werden diese Elektronen jedoch darüber hinaus in Spannungssignale gewandelt und

auf irgendeine Weise verstärkt. Und diesen Umwandlungs- oder Umrechnungsfaktor gilt es zu bestimmen.

Beschrieben wird er durch die sogenannte Photonentransferkurve [1], die die Varianz bzw. das Rauschen in Abhängigkeit des Eingangssignals (Licht) beschreibt. Deren Steigung beschreibt den Systemumwandlungsfaktor oder auch das „System

© 2014 Carl Hanser Verlag, München www.qz-online.de Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern

© QZ – Qualität und Zuverlässigkeit

© QZ – Qualität und Zuverlässigkeit

Gain“ der Kamera (Bild 4). Auf Grundlage eines linearen Kameramodells verläuft diese Kurve in einer linearen Steigung. Doch während etwa bei CCDs die Elektronen nur zu einem zentralen Ausleseverstärker hin verschoben werden, besitzt bei CMOS-Chips jeder einzelne Pixel einen eigenen Ausleseverstärker. Die Möglichkeit, dass sich bei gleicher Lichtquelle systeminterne Signalunterschiede ergeben, erhöht sich dadurch.

Um dieses System Gain gemäß des EMVA 1288-Standards (European Machine Vision Association) zu bestimmen [2], werden von Dunkel bis zur Sättigung unter verschiedenen Helligkeitsbedingungen jeweils zwei Bilder aufgezeichnet. Die beiden Bilder werden voneinander subtrahiert, um die Varianz pro Pixel zu bestimmen. Gemittelt über die gesamte Bildsensordfläche, entsteht so bei jeder Helligkeitsstufe ein Punkt der Photonentransferkurve, welche die Varianz gegenüber dem mittleren Signal darstellt. Über einen linearen Fit wird eine Gerade bestimmt, deren Steigung das gesuchte System Gain ergibt und es somit ermöglicht, aus dem, was hinten rausgekommen ist, die entsprechende Anzahl der Elektronen zu ermitteln.

Damit ist letztlich alles bekannt, was für die Ermittlung des Quantenwirkungsgrads nötig ist: die Photonen, die durch die kalibrierte Fotodiode bestimmt wurden, sowie die Elektronen, die man durch die Umrechnung des ausgelesenen digitalen Signals mittels des Konversionsfaktors errechnet hat.

Einen Quantenwirkungsgrad von 100 Prozent erreicht man mit der heutigen Chiptechnik nicht. Dennoch ist es möglich, Werte von 70 Prozent und höher zu erreichen. Verantwortlich dafür sind zahlreiche Optimierungen, etwa der Abbildungseigenschaften der Mikrolinsen, oder der Einsatz von rückseitig belichteten Bildsensoren.

In jedem Fall ist der Quantenwirkungsgrad ein wichtiger Parameter, der auf neutrale Art und Weise die Empfindlichkeit eines Bildsensors oder eines Kamerasystems beschreibt, und er ist gerade für Anwendungen, in denen die zur Verfügung stehende Lichtmenge ein limitierender Faktor ist, von großer Bedeutung. □

**Dr. Gerhard Holst, Sven Heinzer**

► **PCO AG**  
**info@pco.de**  
**T 09441 2005-0**  
**www.pco.de**