

Scientific CMOS-Bildsensor

DIE NEUE ALLZWECK-LÖSUNG DER BILDAUFNAHME

Vor Kurzem wurde während der Messe ›Laser. World of Photonics‹ mit ›Scientific CMOS‹, oder kurz sCMOS, eine neue Technologie für Bildsensoren vorgestellt. Wie gewöhnlich, wurden die Qualitäten der neuen Technologie, verglichen mit den existierenden Bildsensoren, als überragend dargestellt, aber sind sie dies auch wirklich? Zudem, wie kommt es, dass Firmen, die ansonsten Mitbewerber sind, zusammen eine solche Technologie entwickeln?

GERHARD HOLST

Die Partner bei dieser Entwicklung stellen alle seit Langem Kameras für wissenschaftliche Anwendungen her. Wirft man einen Blick auf die Anforderungen an solche Kamerasysteme, erkennt man sehr schnell, dass die in großen Stückzahlen hergestellten digitalen Bildsensoren des Verbrauchermarkts nicht geeignet sind.

Dies macht folgendes Beispiel deutlich. Hohe Auflösung ist ein Standardwunsch aus vielen Kameraanwendungen, so auch bei den Fotoapparaten und Foto-Handys. Mittlerweile sind 5 bis 12 Megapixel durchaus üblich. Damit möglichst viele Bildsensoren pro Wafer-Fläche hergestellt

werden können und somit der Preis niedrig bleibt, sind Einzelbildpunkt-Größen zwischen 1 und 2 μm^2 üblich. Diese kleinen Pixel haben aber vergleichsweise niedrige maximale Füllkapazitäten für Ladungsträger. Da diese Ladungsträger die technische Entsprechung der Lichtmenge im jeweiligen Bildpunkt sind, ergibt sich aus der maximalen Füllmenge und dem Ausleserauschen die Dynamik, das heißt die Fähigkeit des Bildsensors, Helligkeitsunterschiede im Bild wiederzugeben. Bezogen auf Handy-Kameras ergibt das vielleicht noch eine 6-bit Dynamik, also 64 Helligkeitsstufen, welche unterschieden werden können. Das mag für bunte Bilder reichen, ist aber für Messzwecke überhaupt nicht geeignet.

Anforderungen für die Messtechnik

Von solchen Beispielen für signifikant unterschiedliche Qualitätsanforderungen lassen sich einige finden. Zwar findet man in diesem Markt bei den hochwertigen digitalen Spiegelreflex-Kameras auch hochwertige Bildsensoren, aber diese sind auf dem freien Markt nicht verfügbar. Daraus folgt, dass man wesentlich verbesserte Bildsensoren oder neuere Technologien als Kamerahersteller für wissenschaftliche Anwendungen nur dann erhält, wenn man investiert. Da solche Entwicklungen, gerade wenn sie Neuland betreten, nicht nur teuer, sondern auch risikobehaftet sind, haben sich die drei Firmen Fairchild

Imaging (USA), Andor Technology (Nord-Irland) und PCO (Deutschland) 2008 zusammengefunden, um gemeinsam diese Entwicklung voranzutreiben und zu investieren.

Größer, schneller, empfindlicher

Bei wissenschaftlichen Anwendungen wie auch in anderen Gebieten gibt es eine Reihe von Verbesserungswünschen an Kamerasysteme. Vor allem sind dies:

- höhere Auflösung als 1 MPixel
- höhere Bildrate als 10 Bilder/s
- hohe Empfindlichkeit
- höhere Dynamik >12 bit (1:4096)

Einzelne wie auch die Kombination einiger dieser Leistungsmerkmale sind wichtig für die jeweiligen Anwendungen. Eine höhere Auflösung ermöglicht die Untersuchung von Proben am Mikroskop mit geringerer Vergrößerung und Ausnutzung eines größeren Sichtfelds, was dazu führt, dass Bearbeitungszeiten sinken können und ein höherer Durchsatz erzielt werden kann. In den letzten Jahren hat zudem die Anzahl der Untersuchungen dynamischer Prozesse in der Mikroskopie zugenommen, sei es das zeitliche Verhalten von Membran-Kalzium-Kanälen

oder die Synchronisation von Bildsequenzen mit dem Herzschlag von untersuchten Tieren. Generell ist die hohe Empfindlichkeit eines Bildsensors eine unbedingte Anforderung in spektroskopischen Anwendungen wie in physikalischen Anwendungen, weil entweder das Messsignal ohnehin sehr schwach ist oder die Kosten der benötigten Lichtquellen mit deren Leistung fast exponentiell ansteigen.

Zum Beispiel in der Pharma-Industrie werden die Messvolumen immer kleiner, um einen entsprechenden Durchsatz zu erzielen, was die Menge an leuchtenden Bio-Marker-Molekülen und in der Folge die messbare Lichtmenge weiterhin verringert. Auch hier ist der Bedarf an empfindlichen und rauscharmen Bildsensoren groß. Ein weiterer Aspekt ist die hohe mögliche Im-Bild-Dynamik einiger Anwendungen. Hier gibt es zwar logarithmische Bild-

sensoren, diese sind aber für Lichtmengenbewertungen häufig zu ungenau, daher ist eine hohe Dynamik des Bildsensors sehr wünschenswert.

Wenn es sich um Mikroskopie-Anwendungen dreht, darf aufgrund der optischen Verhältnisse der Bildsensor nicht zu groß werden, was eine optimale Pixelgröße mit einer Kantenlänge im Bereich von 6 bis 8 μm bedeutet, da sonst das optische System und auch die große benötigte Halbleiterfläche zu teuer würden.

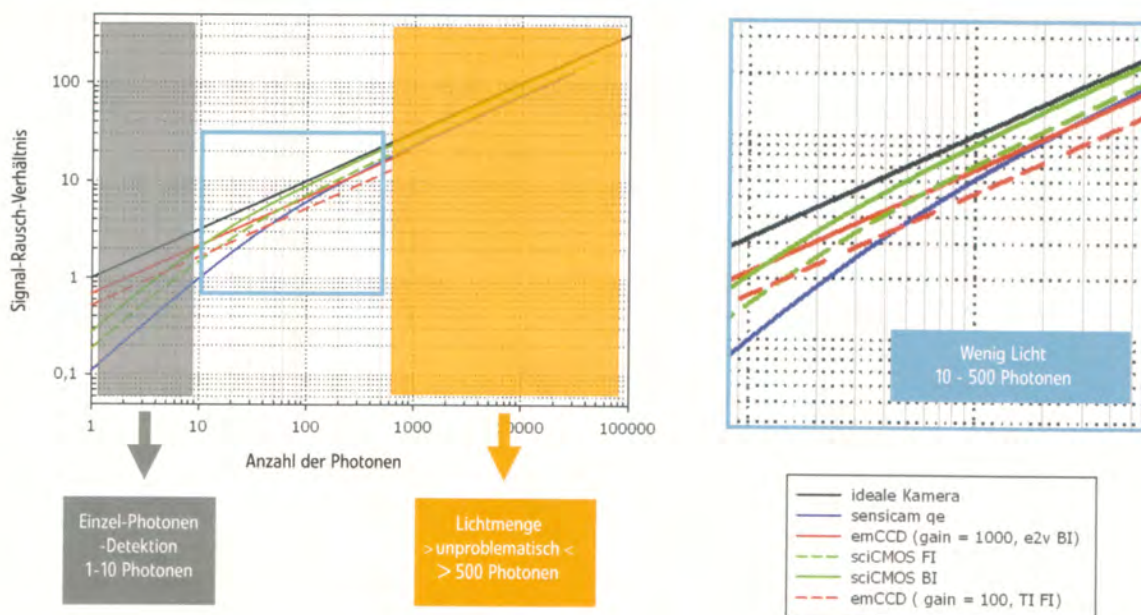
Schon gesehen, oder?

Nimmt man nun die einzelnen Parameter, die verbessert werden sollen, und überprüft das Angebot der Kameras für wissenschaftliche Anwendungen, so stellt man fest, dass es durchaus Kameras gibt, die einen oder zwei dieser Wünsche erfüllen. Es gibt beispielsweise einige CCD-Bildsensoren >4 Megapixel Auflösung (2048 x 2048 Pixel und mehr) mit akzeptablen Rauschwerten von 9 Elektronen. Allerdings gelingt diesen auch bei schneller Ansteuerung (40 MHz) keine Bildrate mit mehr als 15 Bildern/s, und dies auch nur mit höheren Rauschwerten (14 Elektronen) und demzufolge niedrigerer Dynamik (12 bis 14 bit).

KONTAKT

PCO AG
93309 Kelheim, Deutschland
Tel. +49 (0)9441 2005-0
Fax +49 (0)9441 2005-20
www.pco.de
Vision 2009: Stand 6.B12

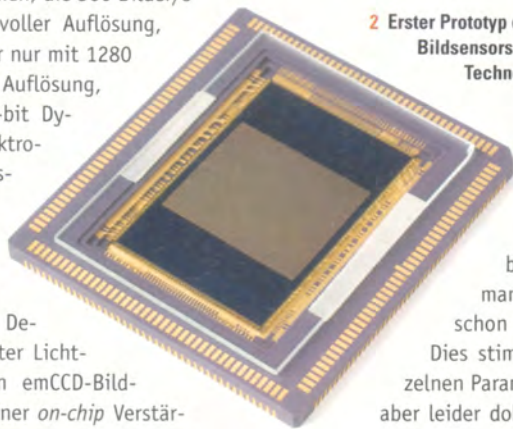
Performance verschiedener Bildsensoren



1 Vergleich der Belichtungsbereiche für verschiedene CMOS/CCD-Bildsensoren (@ 20°C)

Seit einigen Jahren gibt es auch CMOS-Bildsensoren für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die 500 Bilder/s erreichen, bei voller Auflösung, allerdings leider nur mit 1280 x 1024 Pixeln Auflösung, gerade mal 10-bit Dynamik, 18 Elektronen Ausleserauschen und einem Quantenwirkungsgrad unter 50 Prozent. Zur Detektion geringster Lichtmengen wurden emCCD-Bildsensoren mit einer *on-chip* Verstärkung entwickelt, die auch einen guten Quantenwirkungsgrad von zirka 60 Prozent haben und sogar eine Bildrate von 12 bis 30 Bildern/s schaffen. Aber die Verstärkung, die das Ausleserauschen relativiert, kostet Dynamik, zudem ist mehr Auflösung bei diesen in der Herstellung teuren Sensoren nicht in Sicht. Nicht zuletzt hat die Verstärkung dieser emCCD-Bildsensoren im Allgemeinen ein bekanntes Langzeitstabilitätsproblem, welches

eine kontinuierliche Veränderung der Verstärkungskennlinie bewirkt.



2 Erster Prototyp eines Bildsensors in sCMOS-Technologie

Von daher könnte man mit Fug und Recht behaupten, dass man dies alles schon gesehen hat. Dies stimmt für die einzelnen Parameter als solche, aber leider dokumentieren die ebenfalls erwähnten Einschränkungen, dass bisher scheinbar die Optimierung eines Parameters immer auf Kosten der anderen ging. Das wurde in der Vergangenheit vor allem bei der Antwort auf die Frage »Welcher Bildsensor, CCD oder CMOS, ist am besten für den Einsatz in Kameras geeignet?« deutlich. Denn die Antwort lautete: CMOS-Bildsensoren sind aufgrund der intensiv parallelen Signalverarbeitung am besten für Hoch-

geschwindigkeitsaufnahmen mit hohen Bildraten geeignet. Sind die hohe Bildqualität und das geringe Ausleserauschen bei geringem Lichtsignal die entscheidenden Kriterien, sind CCD-Bildsensoren das Bauteil der Wahl. Dazwischen finden beide Technologien in Abhängigkeit von den Rand- und Anwendungsbedingungen ihren Einsatz (Bild 1).

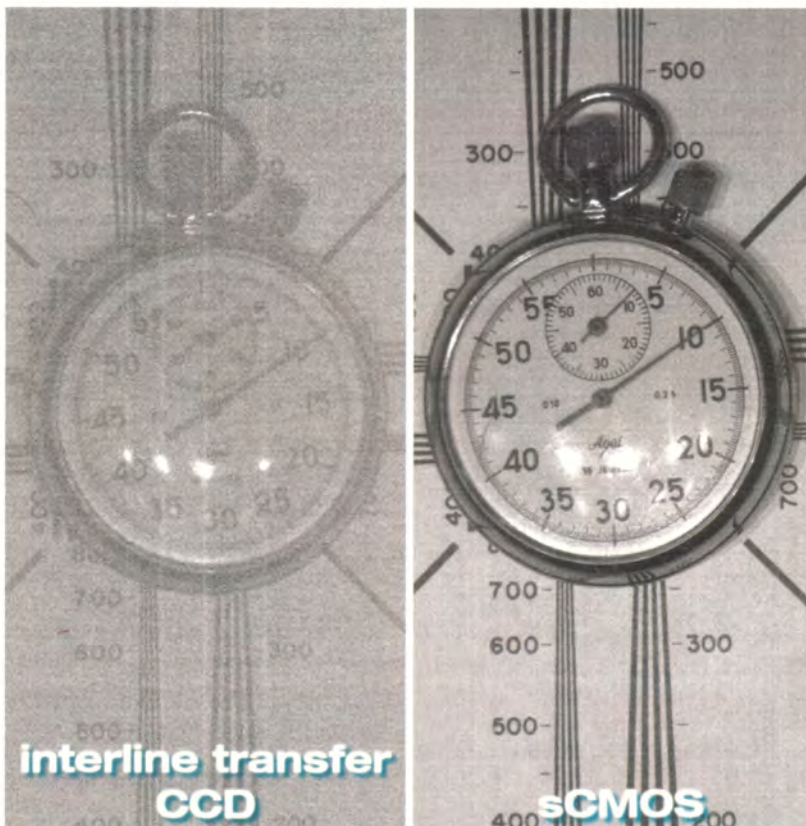
Scientific CMOS – sCMOS

Was allerdings noch nicht gesehen wurde, ist die Kombination aller Verbesserungswünsche, von daher muss die bisherige Antwort wohl doch noch einmal überdacht werden. Der in Bild 2 zu sehende Prototyp eines Bildsensors in der neuen »sCMOS«-Technologie besitzt nämlich folgende Leistungsdaten:

- 2560 x 2160 Pixel Auflösung
- Quantenwirkungsgrad von 60 oder 90 Prozent (*front- beziehungsweise back-illuminated*)
- Ausleserauschen <2 Elektronen bei einer Bildrate von 30 Bildern/s und <3 Elektronen bei einer maximalen Bildrate von 100 Bildern/s
- Dynamik von 1:16.000 (14 bit) bei 30 Bildern/s
- Pixelgröße von $6,5 \times 6,5 \mu\text{m}^2$

Durch eine neuartige Pixelstruktur und Zusammenfassung der Signalwege ist es gelungen, diese Parameter in einem Bildsensor zu vereinen. Beispielsweise wird das jeweilige Signal eines Bildpunkts gleichzeitig mit unterschiedlichen Verstärkungen verarbeitet und mit 11-bit Analog-Digital-Wandlern in einen Zahlenwert umgewandelt. Dies nutzt ohne unnötig komplexe A/D-Wandler-Strukturen die hohe Dynamik des Bildsensors aus und stellt zwei Datenströme zur Verfügung, die wahlweise zu einem hochpräzisen 16-bit Datenwert zusammengefügt werden können, oder, wenn das Datenaufkommen reduziert werden soll, wahlweise für hohe Empfindlichkeit oder hohe Aussteuerung genutzt werden können. Die hohe Auflösung zusammen mit der moderaten Chipgröße (Diagonale von 21,8 mm) ermöglichen eine Vielzahl an Mikroskopie-Anwendungen bei geringerem Vergrößerungsfaktor und damit verbundenem größeren Sichtfeld. Das niedrige Ausleserauschen in Verbindung mit Bildraten von 30 bis 100 Bildern/s ist bislang unerreicht.

In Bild 3 ist ein erster Vergleich von Bildergebnissen zusehen. Das linke Bild



3 Erste Bild-Ergebnisse im Vergleich: die Aufnahme mit einer gekühlten CCD-Kamera für wissenschaftliche Zwecke (links) und die Aufnahme mit einer Test-Prototypen Kamera mit sCMOS-Bildsensor (rechts)

wurde mit einer gekühlten CCD-Kamera für wissenschaftliche Anwendungen aufgenommen. Die Kamera hat einen Bildsensor mit 2048 x 2048 Pixeln (Pixelgröße von $7,4 \times 7,4 \mu\text{m}^2$), der mit 40 MHz angesteuert wurde, um eine Bildrate von 14,7 Bildern/s zu erreichen. Als Kühltemperatur wurde $+10^\circ\text{C}$ eingestellt und das Bild mit einer Belichtungszeit von 1 ms aufgenommen. Das rechte Bild zeigt dieselbe Szene, aufgenommen mit einem Vor-Produktions sCMOS-Bildsensor in einem Kamera-Prototypen-Aufbau. Der sCMOS-Bildsensor hat eine Auflösung von 2560×2160 Pixeln (Pixelgröße $6,5 \times 6,5 \mu\text{m}^2$) und wurde mit 150 MHz angesteuert, um eine Bildrate von 50 Bildern/s zu erreichen. Der sCMOS-Bildsensor wurde mit Umgebungsluft gekühlt und die Aufnahme wurde mit 1,3 ms belichtet, um den Pixelgrößenunterschied zur CCD-Kamera zu kompensieren. Beide Kameras nahmen im gleichen Abstand mit den gleichen Objektiven bei Blende 8 dieselbe Szene mit einer mechanischen Stoppuhr vor einem *test chart* auf. Die Objekte befanden sich in einem licht-

dichten Kasten und wurden mit wenigen LEDs schwach beleuchtet.

Die Bilder sind schwach ausgesteuert ($<200 \text{ counts}$), und zu der schlechteren Bildqualität des CCD-Kamera-Bilds erkennt man eine unvoreilhaftige Eigenschaft von CCDs, die sich trotz des schnellen Auslesens störend bemerkbar macht, nämlich *smear*. Die Reflexionen der Beleuchtungs-LEDs im Stoppuhr-Glas erzeugen beim Auslesen, aufgrund ihrer relativen Helligkeit, zusätzliche Signalanteile, die sich als senkrechte Streifen bemerkbar machen. Scientific CMOS-Bildsensoren haben keine *smear* Effekte. Deutlich ist zudem im Bild die höhere Dynamik des sCMOS-Bildsensors zu erkennen, welche hauptsächlich auf das niedrige Auslese-rauschen zurückzuführen ist.

Fazit: die neue Allzweck-Lösung?

Man wird abwarten müssen, welche Kamerasysteme beziehungsweise Kameras mit sCMOS-Bildsensoren entstehen werden. Aufgrund der bisher

gemessenen Leistungsdaten kann man jedoch behaupten, dass diese sCMOS-Technologie mit ihren Bildsensoren einer Allzweck-Lösung sehr nahe gekommen ist, sodass in Zukunft auch eine Vielzahl von neuen Anwendungen möglich scheint. Weiterführende Informationen zu diesem Thema sind entweder auf der sCMOS-Technologie-Seite (www.scmos.com) zu finden oder auf den Webseiten der Projektpartner: www.andor.com, www.fairchildimaging.com, www.pco.de

AUTOR

Dr. GERHARD HOLST leitet die Wissenschafts- und Forschungsabteilung der PCO, einem der weltweit führenden Hersteller hochwertiger digitaler Kamerasysteme, die Bildverstärker, CCD-, CMOS- und sCMOS-Bildsensoren verwenden. Er ist auch verantwortlich für die Wissensbeiträge und technischen Informationen, die PCO zur Verfügung stellt.

■ www.laser-phonik.de

Diesen Artikel finden Sie online unter der Dokumentennummer **LP110038**



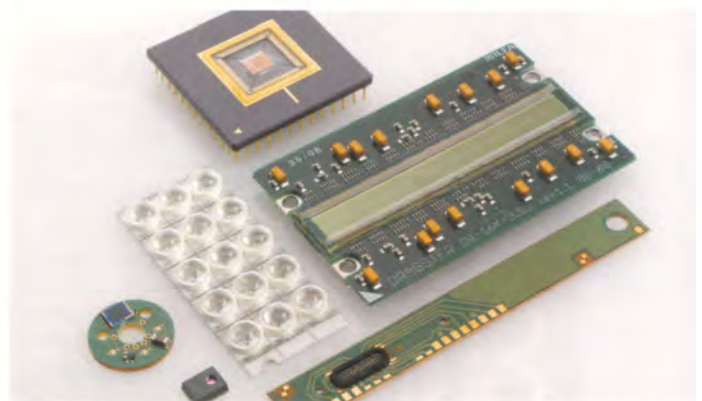
Präzisionsoptik & Feinmechanik Von der Idee bis zur Serie

Als Zulieferbetrieb bieten wir unseren Kunden:

- Beratung
- Entwicklung inklusive Optikdesign
- Konstruktion
- Herstellung
 - Optischer Komponenten
 - Mechanischer Komponenten
 - Montage

Spectros AG
Lohweg 25
CH-4107 Ettingen
Schweiz

Telefon + 41 61 721 12 12
Telefax + 41 61 721 15 66
Homepage www.spectros.ch
E-Mail info@spectros.ch



Optoelektronische Sensoren für Ihr Produkt

Wir sind ihr kompetenter Partner für kunststoffbasierte optische Komponenten sowie optoelektronische und optomechanische Module für die Bereiche **Mobility, Beleuchtung & Energie, Medizintechnik** und Sensorik.

Unsere Kompetenz:

- Produkt Design
- Prototypen
- Optische Beschichtung
- Systemintegration
- Chip Entwicklung
- Optische Komponenten
- Aufbau- u. Verbindungstechnik
- Qualitätssicherung

Besuchen Sie uns auf der ComPaMED in Düsseldorf, 18. - 20.11.2009, Halle 8a, Stand G29.1

Optische Systeme
sales@jenoptik-ps.de
www.jenoptik-ps.de

