

Die sCMOS-Welle

Gerhard Holst, PCO AG, Kelheim

Im Sommer 2009 auf der Messe LASER World of Photonics wurde der Öffentlichkeit ein neuartiger CMOS-Bildsensor mit einer einmaligen Kombination guter Leistungsparameter vorgestellt. Die drei Entwicklungspartner Fairchild Imaging, Andor Technology und PCO nannten ihn scientific CMOS. Nach nunmehr zweieinhalb Jahren ist der Zeitpunkt gekommen, einmal seinen Entwicklungsstand sowie die darauf aufbauenden Kameraprodukte und Anwendungsbereiche zu betrachten.

Nicht nur an der Zahl der Artikel, die scientific CMOS diskutieren, ist zu sehen, dass das Thema die Kunden wie die Kamerahersteller beschäftigt. Anfang 2010, noch bevor die drei Entwickler des neuen Bildsensors ihre ersten Serienprodukte verkaufen konnten, brachte Hamamatsu als weiterer renommierter Hersteller eine neue Kamera mit einem verbesserten CMOS-Bildsensor auf den Markt und verwendete ebenfalls den Begriff scientific CMOS.

Mit dem Interesse stieg auch die Verunsicherung bei Kunden auf der Suche nach lichtempfindlichen, schnellen Kamerasystemen insbesondere für die Mikroskopie. Dort sind mit neuen Techniken wie strukturierte Beleuchtung und Superresolution neue Anwendungsgebiete entstanden, die gut zu den Möglichkeiten der sCMOS-Bildsensoren passen. In vielen Artikeln wurde versucht zu ergründen, wie gut die neuen Bildsensoren im Vergleich zu den etablierten emCCD-Bildsensoren sind. Je nach Situation der Autoren, ob sie sCMOS-Bildsensoren einsetzen oder nicht einsetzen konnten, fiel die Beurteilung eher für die eine oder die andere Seite aus. Mittlerweile hat Hamamatsu in Zusammenarbeit mit Fairchild Imaging ebenfalls einen „echten“ sCMOS-Bildsensor herausgebracht, und auch weitere Firmen platzieren Produkte mit sogenannten scientific CMOS-Bildsensoren. Von daher kann man wohl mit Recht behaupten, dass 2009 eine richtige sCMOS-Welle begonnen hat.

1 Überblick der Leistungsdaten

Vor einem Blick auf die Einsatzgebiete der neuen Bildsensoren vielleicht zu Beginn ein

¹ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine Vergrößerung der Auflösung bei gleichem Blickfeld immer eine Aufteilung des vorherigen Signals auf mehrere Pixel zur Folge hat, die dadurch natürlich für sich betrachtet ein kleineres Signal messen, was durch die geometrische Aufteilung und nicht durch die Empfindlichkeit des Bildsensors hervorgerufen wird.

² Diese Wirkung zu erzielen erfordert eine Verkürzung der Brennweite der abbildenden Optik, was es gestattet, bei gleicher Tiefenschärfe die Blende weiter zu öffnen. Hierdurch verändert sich also das gemessene Signal nicht.

kleiner tabellarischer Überblick über die von den Herstellern angegebenen Leistungsdaten der Kamerasysteme mit sCMOS-Bildsensoren und solchen, die sich so nennen. Bei **Tabelle 1** handelt es sich um eine Auswahl von Parametern, die geeignet sind, einen ersten Vergleich durchzuführen. Sicherlich sind weitere Parameter wie Belichtungszeitbereich, dark signal non-uniformity (DSNU), photo response non-uniformity (PRNU), Teilauslesen (ROI) oder Ähnliches auch von Interesse, aber sie werden leider nur von wenigen Herstellern veröffentlicht. Das Besondere der sCMOS-

Technik ist ja die Kombination hervorragender Leistungsdaten. Vier ausgewählte Vergleichsgrößen sollen besonders erläutert werden:

- Ein niedriges **Ausleserauschen** senkt die Detektionsschwelle, ab der man ein Lichtsignal bei ausreichender Empfindlichkeit messen kann, und erhöht gleichzeitig die Dynamik.
- Eine hohe **Auflösung** sorgt dafür, dass man bei gleichem Blickfeld mehr Details erkennen¹ oder bei gleicher Auflösung ein größeres Blickfeld betrachten kann².
- Eine hohe **Bildrate** ist hilfreich zur



Bild 1: Aufnahme der sCMOS-Farbkamera pco.edge bei Nacht im Rolling Shutter Modus mit 160 ms Belichtungszeit und Blende 4,5. Dasselbe Bild mit unterschiedlich skalierten 8-Bit-Darstellung: oben links 115-65535, oben rechts 115-4420, unten links 115-2020 und unten rechts 115-548. Was aussieht wie die Anwendung von Verstärkung (gain) in der Kamera ist im Rohbild vorhandene Information, in der letzten Darstellung sind sogar die Häuser im Hintergrund des Supermarkts gut zu erkennen

Beobachtung dynamischer Vorgänge oder zur Reduktion der Bilderzeugungszeit bei statistischen Bildaufnahmetechniken wie Superauflösungs-Mikroskopie oder strukturierter Beleuchtung.

- Bei hoher **Dynamik** können besonders detaillierte Strukturinformationen aufgenommen und ausgewertet werden, selbst wenn der Kontrastumfang größer ist, als er sich mit dem menschlichen Auge erfassen lässt. Viele Anwendungen von der Lumineszenz-Mikroskopie bis hin zur Luftaufnahme bilden Situationen mit einem derart hohen Kontrastumfang ab (siehe **Bild 1**). Hier sei auch auf die RAW-Bildverwendung in der digitalen Fotografie verwiesen. Betrachtet man diese Hauptparameter, wird sehr schnell klar, dass einige der in Tabelle 1 aufgeführten sCMOS-Kameras zwar wirklich gute CMOS-Bildsensor-Eigenschaften haben, aber nicht der eigentlich vorgestellten sCMOS-Technik entsprechen. Die

Kamera xSCell fällt wegen der extrem hohen Bildrate etwas aus dem Rahmen, zudem gibt der Hersteller bislang recht wenig Informationen preis, so dass man mit der Beurteilung noch etwas warten muss; sie ist aber der Vollständigkeit halber aufgeführt.

2 Nutzen für den Anwender

Das niedrige Ausleserauschen sorgt dafür, dass die Bildsensoren bereits geringste Lichtsignale detektieren können. Hier haben sich in der Vergangenheit vor allem Kameras mit emCCD-Bildsensor etabliert, die besonders mit ihrer On-Chip-Verstärkung punkten können und in der Lage sind, selbst wenige Photonen zu erfassen, allerdings bei relativ geringer Auflösung, Dynamik³ und Bildrate. In verschiedensten Veröffentlichungen wurden Vergleiche zwischen sCMOS- und emCCD-Bild-

sensoren diskutiert, um herauszufinden, wofür welcher Sensor besser geeignet ist. Die Schlußfolgerungen waren sehr unterschiedlich: Wenn man die zur Verfügung stehenden Daten der Sensorhersteller in das übliche Kameramodell einsetzt (siehe EMVA1288), ergeben sich charakteristische Kennlinien für vergleichbare sCMOS- und emCCD-Kameras mit vorder- oder rückseitig belichteten Bildsensoren. Die Signal-Rauschverhältnis-Kurven (**Bild 2**) zeigen im Bereich weniger Photonen (<8) einen Vorteil für emCCD-Kameras, darüber sieht es für sCMOS-Kameras besser aus. Die Position des Schnittpunkts dieser Kurven hängt

³ An sich haben emCCD-Bildsensoren wegen ihrer hohen Fullwell-Kapazität eine relativ gute Dynamik, allerdings erfordern sie eine on-Chip-Verstärkung, da sonst das Ausleserauschen zu hoch ist, und die Dynamik wird dann durch die Verstärkung reduziert, da diese ja den nutzbaren Fullwell-Bereich verringert.

Kamera	pco.edge	Neo	SciMOS2051	ORCA Flash2.8	ORCA Flash 4.0	Rolera Bolt	Osprey	cooled sCMOS camera	xSCell
Hersteller	PCO AG	Andor Technology	BAE Systems (Fairchild)	Hamamatsu	Hamamatsu	Q-Imaging	Raptor Photonics	Photonics Science Ltd	Photonis
Sensor	CIS2051	CIS2051	CIS2051	FL-280	FL-400	IMX035	CMV4000	CIS1021	InXite
Auflösung [Pixel]	2560 x 2160	2560 x 2160	2560 x 2160	1920 x 1440	2048 x 2048	1280 x 1024	2048 x 2048	1920 x 1080	1024 x 1024
Pixelgröße [µm²]	6.5 x 6.5	6.5 x 6.5	6.5 x 6.5	3.63 x 3.63	6.5 x 6.5	3.63 x 3.63	5.5 x 5.5	6.5 x 6.5	15 x 15
Diagonale [mm]	21.8	21.8	21.8	8.7	18.8	5.95	15.9	14.3	21.7
QE max [%]	55 (590 nm)	57 (590 nm)	55 (590 nm)	66 (490 nm)	70 (600 nm)	66 (490 nm)	64.6 (610 nm)	> 50 (600 nm)	65 (-)
rolling shutter	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	keine Angaben
global shutter	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	ja	keine Angaben
Ausleserauschen rolling shutter [e-]	< 1.1 _{med} @30 fps	1.0 @30 fps	1.5 typical	3	1.3 @ 100 fps	3	kein rolling shutter	1	1 @ 10fps
Ausleserauschen global shutter [e-]	< 2.2 _{med} @100 fps	2.3 @30 fps	keine Angaben	kein global shutter	kein global shutter	kein global shutter	< 7	1.4	keine Angaben
Fullwell Kapazität [e-]	30 000	30 000	35 000 typical	18 000	30 000	17 000	14 000	30 000	30 000
Dynamik Rolling Shutter Betrieb	1 : 27 273	1 : 30 000	1 : 23 333	1 : 6000	1 : 23 077	1 : 5667	kein rolling shutter	1 : 30 000	1 : 30 000
Dynamik Global Shutter Betrieb	1 : 13 636	1 : 13 043	keine Angaben	kein global shutter	kein global shutter	kein global shutter	1 : 2000	1 : 21 429	keine Angaben
Ausgabewert [Bit]	11 / 16	11 / 16	16	16	16	8 / 12	12	2x 11	14
Dunkelstrom [e-/pixel s]	2..6 @+5°C rolling sh.	0.07 @-30°C 0.03 @-40°C	10..25 @ + 20°C	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	< 0.5 @ -20°C	0.5 @ -30°C
Kühlung [°C] @ 20° Aussentemperatur	+ 5	-30 / -40	+ 20	+ 5	-10 / -30	keine Regelung	-20	-20	-30
Bildrate maximal (Vollbild) [fps]	100	100	100	45.4	100	30	37.5	20	1000
Datenschnittstelle	Camera Link Full (10 Tap)	Camera Link, USB 2.0	Camera Link Full	Camera Link Base	Camera Link Full (Deca Mode)	USB 2.0	Camera Link Full	GigE, Camera Link Base / Full	keine Angaben
Abmessungen [mm³]	70 x 76 x 88.3	120 x 144 x 160	88 x 88 x 150	95 x 95 x 150	85 x 85 x 125	85 x 71 x 95	86 x 65 x 61	keine Angaben	21 x 23 x 18
Gewicht [kg]	0.7	3.4	0.45	1.5	2.0	0.54	0.43	keine Angaben	4
Webseite	www.pco.de	www.andor.com	www.fairchild-imaging.com	www.hamamatsu.com	www.	www.qimaging.com	www.raptor-photonics.com	www.photonic-science.co.uk	www.photonis.com

Tabelle 1: Vergleich 18 ausgewählter Parameter neun verschiedener sCMOS-Kameras (incl. solcher, die sich an scientific CMOS anlehnen). Die Werte sind den aktuellen Datenblättern der Hersteller entnommen. Der Quantenwirkungsgrad QE eines Bildsensors definiert sich dabei als das Verhältnis der erzeugten Ladungsträger zu den auftreffenden Photonen

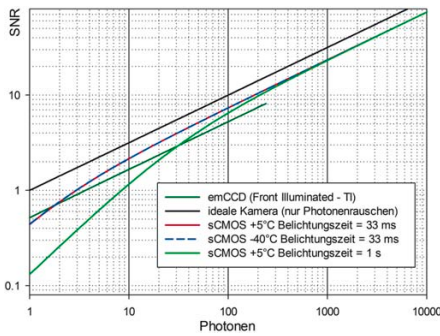


Bild 2: Signal-Rauschverhältnis- (SNR-) Kurven von sCMOS- und emCCD-Kameras

davon ab, welche Temperatur und Belichtungszeit jeweils angenommen wird und wieviel Dunkelstrom somit zum Rauschen beiträgt. Dadurch kann sich der Schnittpunkt von 6 – 10 Photonen verschieben. sCMOS-Kameras bieten somit schon bei sehr kleinen Signalen ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis bei zugleich hoher Bildrate.

Die hohe Auflösung ermöglicht es nun, an Mikroskopen größere Blickfelder zu erfassen, so dass Proben schneller und mit geringerer Belastung untersucht werden können. Zudem ermöglicht die hohe Auflösung, wenn ausreichend Licht vorhanden ist, einen wesentlich höheren Detailreichtum, was auch für Messtechniken wie 3D-Vermessung oder Luftbild-Fotografie mit 3D-Auswertung von Bedeutung ist.

Allerdings führt der Wunsch nach hoher Auflösung und Dynamik zu größeren Bilddateien und somit auch zu mehr Aufwand bei der Datenverarbeitung und beim Speichern. Zwar werden die Datenspeicher auch immer größer, aber zumindest im Kamerabereich ist die Datenübertragung gelegentlich ein Flaschenhals, und es wird durch verschiedenste Ansätze versucht, diesen zu erweitern. Verschiedene sCMOS-

Kameras speichern entweder die Daten in der Kamera ab, um sie später in den PC zu übertragen, oder die Daten werden in Echtzeit in das RAM oder ein Festplatten-System eines PC übertragen. Dies ist bei Vollauflösung mit visuell verlustfreier Kompression möglich.

Einer der wichtigen Vorteile von sCMOS ist sicherlich die hohe Intra-Szenen-Dynamik, die sich aus der Fullwell-Kapazität und dem Ausleserauschen ergibt (siehe Tabelle 1), denn die Dynamik ist als Verhältnis aus diesen beiden Größen definiert und beschreibt den maximal erfassbaren Signal-Abstand zwischen dem dunkelsten und hellsten Punkt in einem Bild. Zudem bestimmt dieser Wert die erforderliche Auflösung der Analog/Digital-Wandlung. Für Kameras mit sowohl rollendem als auch globalem Verschluss (Rolling und Global Shutter) ergibt dies bei unterschiedlichen Werten für das Ausleserauschen auch unterschiedliche Dynamikwerte. Für den Anwender bedeutet eine höhere Dynamik, dass das Bild einen höheren Kontrastumfang haben kann, entsprechend mehr Grauwertstufen. Freilich vermag das normale menschliche Auge nur 256 Grauwertstufen zu unterscheiden⁴. Alle Monitore, Fernseher, Bücher und Drucke sind auf 8 bis 10 Bit (HDMI, HD-SDI) ausgelegt, was $2^8 = 256$ bis $2^{10} = 1024$ Helligkeitsstufen entspricht. Mehr als das kann man nicht sehen, warum sollte man mehr aufnehmen?

Nun, zum einen möchte man gerne mehr erfassen, weil man es ja auswerten kann, und man somit in einem Bild genügend Informationen hat, die man gut aufgelöst untersuchen oder analysieren kann. Zum anderen ist aus der Fotografie und dem TV/Film-Geschäft der Wunsch nach hoher Dynamik bekannt, um sich erst im Anschluss in der Bildbearbeitung und -auswertung entscheiden zu können, welcher Teil des Bildes herausgehoben oder besonders dargestellt werden soll.

Allerdings müssen sich im Fall von Bildern mit hoher Dynamik auch die Anwender eventuell umgewöhnen, wie man anhand der Serie von Aufnahmen in **Bild 3** sehen kann. Alle vier Teilbilder zeigen denselben Ausschnitt aus demselben Bild und sind nur in der 8-Bit-Welt des Drucks und des menschli-

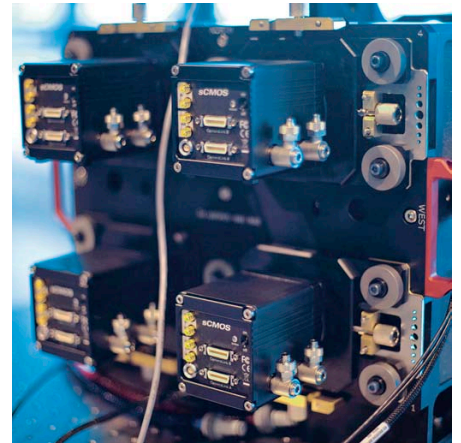


Bild 4: Anwendungsbeispiel eines Geräts, das vier wassergekühlte sCMOS-Kameras einsetzt, um Fluoreszenz-Aufnahmen mit hoher Bildrate aufzunehmen

chen Auges unterschiedlich dargestellt. Von links nach rechts: das erste Bild zeigt das übliche Problem, das entsteht, wenn ein nicht maximal ausgesteuertes 16-Bit-Bild im 8-Bit-Raum eines Monitors betrachtet wird, die lineare Skalierung findet von 0–65535 => 0–255 statt, d.h. der Maximalwert von 65535 würde im Bild 255 (also weiß) entsprechenden. Offensichtlich ist das Ergebnis unbefriedigend, man kann irgendeine Struktur erahnen, aber mehr auch nicht. Das nächste Bild zeigt eine Minimum-Maximum-Darstellung desselben Bildes. Hierbei findet die lineare Skalierung von 0–9888 => 0–255 statt, so dass ein Wert von 9888 im 16-Bit-Bild jetzt in der 8-Bit-Darstellung 255 und somit weiß entspricht. Jetzt sind schon einige Neuronen zu erkennen, aber die Verbindungen sind sehr schlecht zu sehen. Wird nun die Relation wie im nächsten Bild weiter geändert, so dass die lineare Skalierung von 0–2048 => 0–255 stattfindet, tauchen auf einmal viel mehr Verbindungen auf, aber die Synapsen sind jetzt zu großen weißen Flecken der virtuellen „Überbelichtung“ geworden. Hier sieht man, dass die Dynamik des Bildes den 8-Bit-Darstellungsbereich übersteigt. Aber alle Informationen sind im 16-Bit-Bild vorhanden und können ausgewertet werden. Wenn man möglichst viel in einem Bild sehen möchte, nutzt man den Kunstgriff der nicht-linearen Darstellung, z.B. mit logarithmischer Kennlinie oder lokaler Kontrastverstärkung (high dynamic range, HDR), wie sie im letzten Bild durch

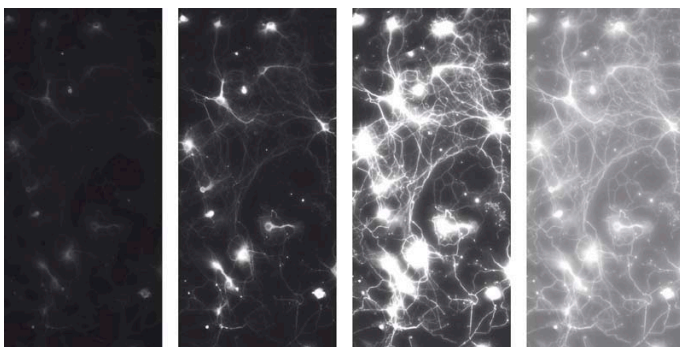


Bild 3: Vier verschiedene Darstellungen desselben Bildausschnitts aus einem Vollbild fluoreszenzmarkierter Neuronen. Von links nach rechts: Skalierung 0–65536, Skalierung 0–9888, Skalierung 0–2048, Skalierung nichtlinear (hohes Gamma)

⁴ Die Ausnahme bilden Radiologen, die der Ansicht sind, dass sie nach entsprechendem Training in der Lage sind, bis zu 1024 Graustufen zu unterscheiden, was sie für Röntgenbilder benötigen. Deshalb gibt es spezielle monochrome 10 Bit Monitore.

ein sehr großes Gamma⁵ bei der Darstellung erreicht wird. Zwar ist das Bild jetzt etwas flauer im Kontrast, aber, sowohl die Neuronen als auch ihre Verbindungen, sind gut zu erkennen. Im Gegensatz zu CMOS-Bildsensoren mit logarithmischer Empfindlichkeit liegen die Helligkeitsstufen hier mit einer linearen Teilung vor.

3 Kühlung

In Tabelle 1 ist zu sehen, dass bis auf zwei Kameras bei allen anderen der Bildsensor auf Temperaturen von -40°C bis +20°C gekühlt oder thermisch stabilisiert wird. Dies war und ist bei wissenschaftlichen Kameras üblich, gilt gewissermaßen als Qualitätsmerkmal und wird dementsprechend in Vergleichen auch hervorgehoben. Jedoch lohnt es sich zu fragen, warum denn gekühlt wird: Der erste Grund ist die Verringerung des Bildsensor-Dunkel-

stroms. Dieser liegt technisch bedingt bei CMOS-Bildsensoren immer höher ist als bei CCD-Bildsensoren, erhöht den Untergrund (Offset) des Signals, macht es somit größer und trägt zum Ausleserauschen bei (siehe EMVA1288). Allerdings tut er dies proportional zur Belichtungszeit.

Nun sind die Dunkelstromwerte der sCMOS-Bildsensoren schon sehr niedrig im Bereich weniger Elektronen pro Pixel und pro Sekunde (siehe Datenblätter). Selbst bei der langsameren Bildrate von 30 Bildern/s ergibt sich eine maximale Belichtungszeit von 33 ms, woraus sich bei einem Wert von z.B. $4 \text{ e}^-/(\text{pixel s})$ ein Dunkelstrom pro Pixel von $0,033 \times 4 \text{ e}^- = 0,13 \text{ e}^-$ ergibt, der für das Ausleserauschen vernachlässigbar ist. Erst bei längeren Belichtungszeiten von mehreren Sekunden bringt eine Kühlung einen wirklichen Vorteil.

Der zweite Grund für eine Kühlung ist die Stabilisierung des Offset-Wertes, d.h. durch eine geregelte konstante Temperatur des Bildsensors wird ein stabiler, konstanter Offset erreicht, was allerdings unabhängig von der gewählten Kühltemperatur ist.

Auch sollte in der Praxis berücksichtigt werden, dass die Ladungsträger-Beweglichkeit im Halbleiter temperaturabhängig ist, was dazu führt dass bei größeren Wellenlängen im Bereich von Rot bis NIR der Quantenwirkungsgrad bei tiefen Temperaturen signifikant abnimmt. Anwendungen mit langwelligen Biomarkern oder auch Elektrolumineszenz-Messungen von Solarzellen profitieren daher nicht von einer tiefen Kühlung.

4 Anwendungsbereiche

Der Bereich der Lebenswissenschaften (Biotechnologie & Medizin) hatte als erstes ein verstärktes Interesse an sCMOS-Kameras, vor allem wegen der Kombination von niedrigem Rauschen, großer Empfindlichkeit und hohen Bildraten. Gerade neuere Mikroskopie-Techniken wie Superauflösungs-Mikroskopie und strukturierte Beleuchtung müssen viele Einzelbilder aufnehmen, um dann dem Benutzer ein Ergebnisbild anzeigen zu können. Zudem gibt es wohl auch im Bereich der DNA-Analyse neue Techniken, die schwache Fluoreszenz-Signale auswerten. Dennoch

⁵ Die Gammakorrektur überführt eine lineare Kennlinie in eine Potenzfunktion, die mit dem Exponenten Gamma zunimmt. Bei $\text{Gamma} > 1$ beginnt die korrigierte Kennlinie flach und steigt dann immer steiler an.

soll dies mit hohem Durchsatz passieren (siehe **Bild 4**). In der PIV-Strömungsmesstechnik (Particle Image Velocimetry) werden sCMOS-Kameras eingesetzt, weil sie durch ihre Bildrate und Empfindlichkeit den Einsatz von Lasern mit geringerer Lichtleistung ermöglichen. Im Bereich der Luftbilderfassung und 3D-Vermessung ist die hohe Auflösung in Verbindung mit der hohen Dynamik von Vorteil.

Zudem haben sCMOS-Bildsensoren den Vorteil einer guten NIR-Empfindlichkeit, was ihren Einsatz in der Photovoltaik bei der Qualitätskontrolle von Solarzellen und -modulen begünstigt. Hierbei wird die Elektrolumineszenz genutzt, die Solarzellen abgeben, wenn man sie in Flussrichtung bei Nennstrom betreibt. Das Maximum der Strahlung liegt zwar bei 1150 nm jenseits der spektralen Empfindlichkeit von Silizium, aber das Spektrum zwischen 1000 und 1050 nm ist durchaus geeignet, um in Belichtungszeiten <1 s Bilder aufzunehmen und die Qualität zu überprüfen.

5 Fazit

Bedingt auch durch die steigende Anzahl an angebotenen sCMOS-Kameras können sich die Anwender nunmehr auch im direkten Vergleich von deren Leistungsfähigkeit überzeugen, so dass sich in naher Zukunft mit Sicherheit noch eine Vielzahl von Anwendungen ergeben werden, die die Qualität der sCMOS-Bildsensoren voll ausnutzen. Allein die steigende Anzahl von Unterhaltungsgeräten mit hoher Dynamik in Fernsehern, Computern und Autos, die alle geprüft werden müssen, könnte ein interessantes Einsatzgebiet werden. Vielleicht sind die Nachsichteseigenschaften für anspruchsvolle Anwendungen in der Sicherheitstechnik interessant. Auf jeden Fall ist derzeit ein Nachlassen der sCMOS-Welle nicht abzusehen.

Literaturhinweise:

- [1] C. Coates, *New sCMOS vs. Current Microscopy Cameras*, Bio Photonics, May 2011

- [2] M. Baker, *Faster Frames, Clearer Pictures*, *Nature Methods* (2011), Vol. 8, Nr. 12, pp. 1005-1009

- [3] J. Joubert, Y. Sabharwal, D. Sharma, *Digital Camera Technologies for Scientific Bio-Imaging Part 3: Noise and Signal-to-Noise-Ratios*, *Microscopy & Analysis*, Sept. 2011, pp.1-4

- [4] G. Holst, *Scientific CMOS Camera – from Micro to Macro*, *Laser + Photonics* (2011), pp. 42-45

Ansprechpartner:

Dr. Gerhard Holst
Science & Research
PCO AG
Donaupark 11
D-93309 Kelheim
Tel. 09441/2005-36
Fax 09441/2005-20
eMail:
gerhard.holst@pco.de
Internet: www.pco.de



www.photonik.de

► Webcode 1001