

Moderne CMOS-Kameras als Ersatz für CCD-Kameras

Anfang 2015 hat der weltgrößte Hersteller für CCD-Sensoren, Sony, alle auf dieser Technologie basierenden Sensoren abgekündigt und allmählich werden die ersten Kameras mit diesen Sensoren ebenfalls abgekündigt. Viele Anwender stellen sich nun die Frage, was die neuesten CMOS-Sensoren gegenüber alten Sensoren für Vorteile bringen, insbesondere, wenn sie bislang CCD-basierte Kameras verwendet haben.

Wir wollen in diesem White Paper diese Frage genauer erörtern, indem wir die Sensor-Technologien kurz erklären, neue CMOS-Sensoren mit CCD-Sensoren vergleichen und Hinweise geben, wann es Sinn macht, eine neue Kamera mit CMOS-Sensoren auszuwählen und was nach der Integration zu beachten ist.

Inhalt

1. Was unterscheidet die beiden Sensortechnologien?..1	
1.1 Aufbau CCD-Sensor	1
1.2 Aufbau CMOS-Sensor	1
2. Wenn man bei CCD hohe Auflösung benötigt: Der Multi-Tap- Sensor	2
3. Gründe warum neueste CMOS-Sensoren den CCD Sensoren überlegen sind	3
4. Wann sollte man über einen Wechsel der Kameratechnologie nachdenken?	4
5. Was ist bei der Integration von neuesten CMOS- basierten Kameras zu beachten?	4
5.1 Bestimmung der richtigen Kamera aus benö- tigter Auflösung, Sensor- und Pixelgröße	4
5.2 Definition des benötigten Kamera-Interfaces	5
5.3 Auswahl von Objektiv und Beleuchtung.....	5
5.4 Integrationsaufwand für Software und Kamera- Ansteuerung	5
5.5 Auswahl der richtigen Nachfolge-Kamera.....	6
6. Fazit.....	6



Abbildung: CMOS-Sensor

1. Was unterscheidet die beiden Sensortechnologien?

Auf dem Markt existieren sowohl CCD (charge coupled device)- als auch CMOS (complementary metal oxide semiconductor) - Bildsensoren. Ihre Aufgabe ist es, Licht (Photonen) in elektrische Signale (Elektronen) umzuwandeln. Die Informationen werden jedoch von beiden Sensor-Arten auf unterschiedliche Art und Weise weitergeleitet und auch der Aufbau ist grundverschieden.

1.1 Aufbau CCD-Sensor

Beim CCD-Sensor werden die Ladungen der lichtempfindlichen Pixel verschoben und ausgelesen. Die Ladungen, die durch Belichtung auf einem Halbleiter entstanden sind, werden mit Hilfe sehr vieler kleiner Verschiebe-Operationen (vertikale und horizontale Schieberegister), ähnlich wie in einer „Eimerkette“, zu einem zentralen A/D-Wandler transportiert. Die Verschiebung der Ladungen wird mit Hilfe von elektrischen Feldern erzwungen, die über Elektroden im Sensor erzeugt werden (siehe Abbildung 2).

1.2 Aufbau CMOS-Sensor

Beim CMOS-Sensor ist zu jedem einzelnen Pixel ein Kondensator als Ladungsspeicher parallel geschaltet. Dieser wird bei Belichtung des Pixels durch deren Fotostrom aufgeladen. Die erzeugte Spannung ist proportional zur Helligkeit und zur Belichtungszeit. Im Gegensatz zu CCDs werden die bei der Belichtung im Kondensator angesammelten Elektronen nicht zu einem einzigen Ausleseverstärker verschoben, sondern direkt am Entstehungsort über eine eigene dem Pixel zugeordnete Elektronik in eine messbare Spannung umgewandelt, die dem Analog-signalprozessor zur Verfügung gestellt wird.

Jedes Pixel kann mittels zusätzlicher Elektronik pro Pixel einzeln ausgelesen werden, ohne dass wie beim CCD Ladung verschoben werden muss. Dies führt dazu, dass die Bildinformation sehr viel schneller ausgelesen werden kann als beim CCD-Sensor und dass Artefakte bei Überbelichtung, wie z.B. Blooming und Smearing deutlich geringer ausfallen, bzw. gar nicht vorhanden sind. Der Nachteil ist, dass die zusätzlichen Halbleiterelemente Platz benötigen, der als lichtempfindliche Fläche nicht zur Verfügung steht. Der Anteil der lichtempfindlichen Fläche an der Sensorfläche (über den Füllfaktor definiert) ist also kleiner als beim CCD-Sensor. Theoretisch kann man dadurch weniger Photonen bei gleicher Pixelgröße für die Bildinformation einsammeln. Es gibt jedoch Methoden, diesen Nachteil abzumildern.

Eine Methode, die besonders für kleine Pixel geeignet ist, ist die so genannte Back Illumination (BI), die bei Sonys

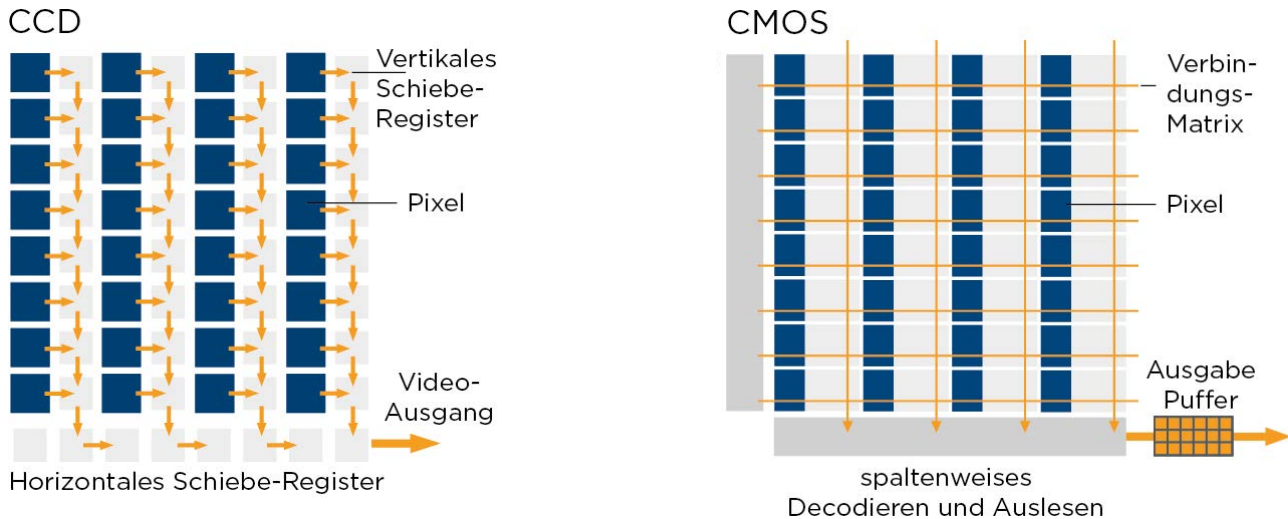


Abbildung 2: Aufbau eines CCD-Sensors (links) und eines CMOS-Sensors (rechts). Beim CCD-Sensor wird die Ladung pro Pixel weiterschoben. Beim CMOS-Sensor hingegen, wird jedes Pixel direkt ausgelesen, was den CMOS-Sensor deutlich schneller macht.

neuesten Rolling Shutter-Sensoren mit der Exmor R Technologie eingesetzt wird. Dabei wird die Ausleseelektronik von der Front- auf die Rückseite des Sensors verlegt und somit nahezu die gesamte dem Licht entgegen gerichtete Fläche zur Photoreaktion freigeschaltet. Diese Technologie erklären wir im Detail in unserem White Paper Sensor-Vergleich: [IMX gleich IMX?](#)

2. Wenn man bei CCD hohe Auflösung benötigt: Der Multi-Tap-Sensor

Das Verschieben der Ladung im CCD-Sensor erfordert viel Zeit. Das ist insbesondere ein Nachteil bei hochauflösenden Sensoren, wo die Ladung aufgrund der großen Zahl an Pixeln über viele Verschiebeoperationen dem zentralen Verstärker zugeführt werden muss. Das setzt der maximalen Bildwiederholrate enge Grenzen. Die technische Antwort auf dieses Problem ist der Multi-Tap-Sensor.

Im Multi-Tap-Sensor ist die Sensorfläche in einige Tap-Bereiche aufgeteilt. Jeder Tap-Bereich verfügt über eine eigene Elektronik zur Signalerzeugung und einen eigenen Ausgang, den sogenannten Tap. Über die Taps werden die Bildinformationen der Tap-Bereiche gleichzeitig über kürzere Strecken und daher schneller verschoben, verstärkt und ausgelesen. Später müssen diese Bereiche wieder zu einem Bild zusammengesetzt werden. Das Multi-Tap-Verfahren ermöglicht zwar eine hohe Auflösung und Geschwindigkeit, hat aber auch den Nachteil, dass es sehr komplex ist. Die einzelnen Tap-Elektroniken müssen aufeinander abgeglichen werden. Schon kleinste Abweichungen führen zu sichtbaren Unterschieden im Bild, die sich anhand der Tap-Grenzen vor allem für das mensch-

liche Auge als sichtbar zeigen. Generell ist der Stromverbrauch größer, was zu mehr Wärmeentwicklung in der Kamera führt. Das erhöht tendenziell das Rauschen des Sensors und macht ggf. besondere Kühlmaßnahmen nötig.

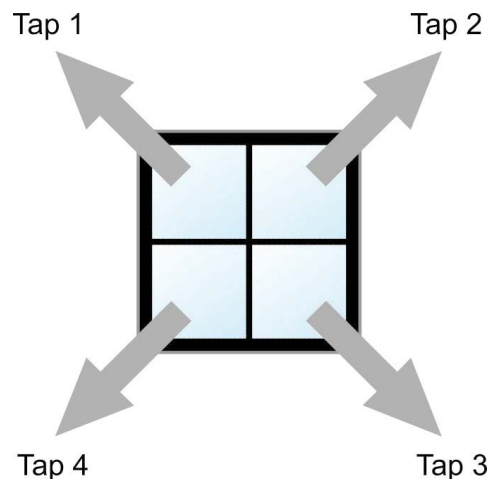


Abbildung 3: 4-Tap-Sensor

Durch ihre hohe Geschwindigkeit und ihren internen Aufbau besteht bei CMOS-Sensoren auch hoher Auflösung nicht die Notwendigkeit zum Einsatz der Multi-Tap-Architektur. Somit können mittlerweile auch große Sensoren mit hoher Auflösung ohne die oben beschriebenen Nachteile bzw. Komplexitäten in Kameras integriert werden.

3. Gründe warum neueste CMOS-Sensoren den CCD Sensoren überlegen sind

Nicht nur die speziellen Multi-Tap-CCD-Sensoren, sondern auch Standard-CCD-Sensoren zeigen einige Nachteile gegenüber CMOS-Sensoren.

	CCD-Sensoren	Neue CMOS-Sensoren
Shutter	Global	Global oder Rolling
Kosten für Kamera/Sensor bei gleicher Auflösung	Sehr hoch	Mittel (Global Shutter) bis sehr niedrig (Rolling Shutter) ¹
Maximale Auslesegeschwindigkeit	Oft nicht mehr als 20 fps	Sehr hoch, nahezu unbegrenzt (z.B. 4 MP Global Shutter-Sensoren mit 180 fps)
Stromverbrauch	Hoch	Niedrig
Objektivauswahl	Eingeschränkt, da Sensor-Formate meist >2/3"	Sehr groß (1/4" - 1")
Bildqualität ² : Dynamik-Bereich	Gut	Gering bis sehr gut
Bildqualität: Empfindlichkeit ²	Gut	Gering bis sehr gut
Bildqualität: Dunkelrauschen ²	Wenig	Wenig
Bildstörung durch Tap-Konfiguration ²	Kann auftreten, muss umständlich kalibriert werden (Nur für Multi-Tap-CCD-Sensoren gültig.)	Nein
Bildstörung „Blooming“	Ja	Nein
Bildstörung „Smearing“	Ja	Nein

Erst seit kurzem sind hochauflösende Global Shutter-CMOS-Sensoren erhältlich. Früher basierten viele CMOS-Sensoren nur auf Rolling Shutter. Auch die Bildqualität übertrifft bei vielen CMOS-Sensoren heutzutage die Bildqualität von CCD-Sensoren. Dies ist auch einer der Gründe warum selbst der Weltmarktführer für CCD-Sensoren (Sony), seine CCD-Sensoren abgekündigt hat und sich komplett auf CMOS konzentriert. Dabei wurden mit der Pregius-Reihe von Sony sehr gute Ersatzsensoren als Update älterer CCD-Systeme geschaffen. Doch auch viele andere neue CMOS-Sensoren können als Update und/oder Upgrade bestehender CCD-Systeme genutzt werden. Eine gute Übersicht der CCD-Alternativen finden sie auf der [Basler Website](#).



Abbildung 4: Ein Beispiel aus dem Bereich ITS: das Bild links wurde mit einem 4-Tap-CCD-Sensor, dem KAI4050 Sensor von ON Semiconductor (ehemals Kodak) aufgenommen. Das Bild rechts wurde mit dem neuen CMOS-Sensor IMX174 von Sony aufgenommen. Sehr gut ist der im rechten Bild deutlich höhere Dynamikumfang zu sehen, der es ermöglicht, sowohl den Fahrer als auch das Nummernschild im gleichen Bild besser zu erkennen. Zudem ist bei annähernd gleichen Einstellungen der Sensor deutlich empfindlicher, es sind entsprechend mehr Details im Hintergrund erkennbar.

¹ Für einen detaillierten Vergleich von Global und Rolling Shutter, lesen Sie unser White Paper Global Shutter, Rolling Shutter -Funktionsweise und Merkmale zweier Belichtungsverfahren (Shutter-Varianten)

² Anmerkung zur Tabelle: Die Bildqualität hängt sehr stark von dem genauen Sensor-Typ und von der Implementierung des Sensors durch den Kamerahersteller ab.

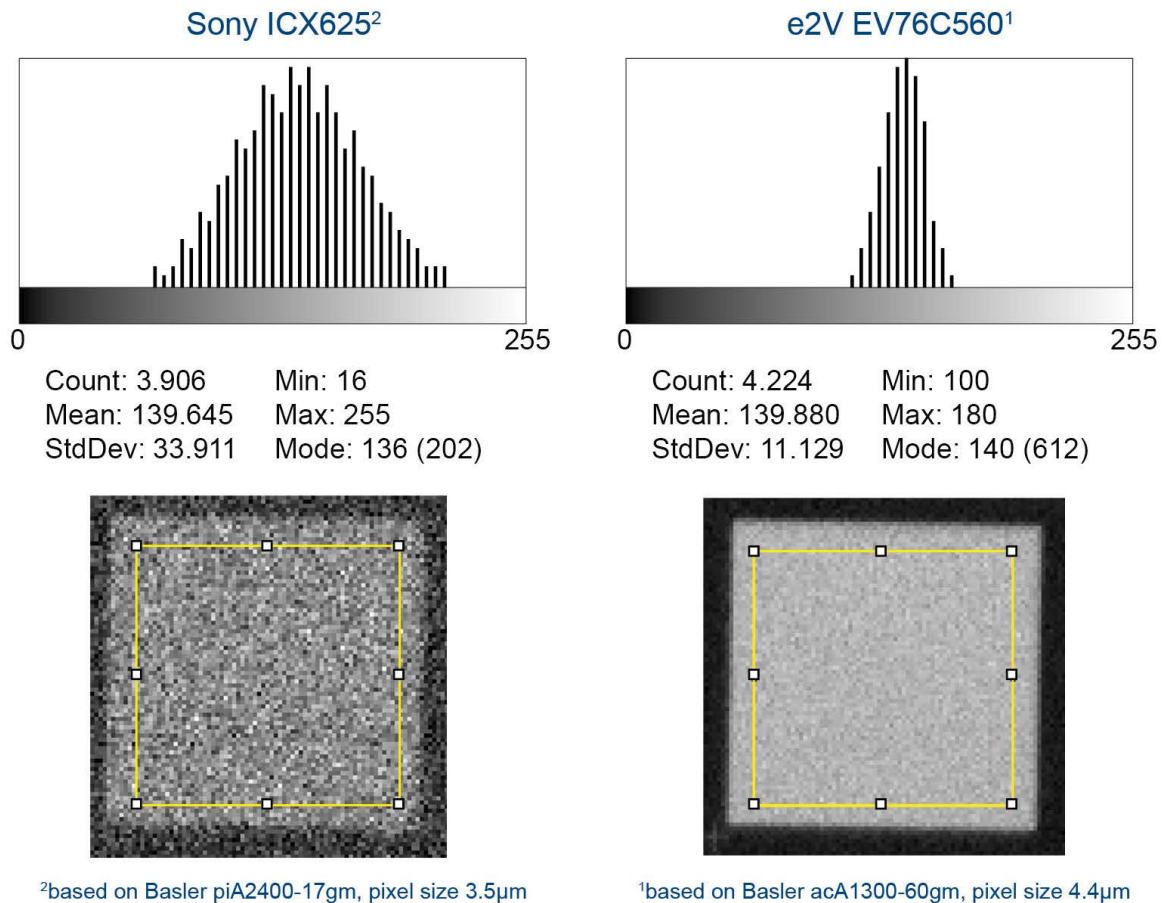


Abbildung 5: Ein guter Vergleich für die Bildqualität ist die Tendenz zum Rauschen eines Sensors bei sonst gleichen Einstellungen. Das Signal-zu-Rausch Verhältnis (SNR) lässt sich am besten innerhalb einer homogenen hellgrauen Fläche ermitteln (Bilder unten), indem man sich das Histogramm (Bilder oben) anschaut. Je geringer die Spreizung der Grauwerte, desto besser. In dem Beispiel ist links der CCD Global Shutter-Sensor von Sony ICX625 zu sehen und rechts der CMOS-Global Shutter-Sensor EV76C560 von e2V zu sehen. Der Einfluss der Pixelgröße wurde herausgerechnet.

4. Wann sollte man über einen Wechsel der Kamertechnologie nachdenken?

Wenn eine oder mehrere der folgenden Fragen mit „Ja“ beantwortet werden können, sollte der Wechsel zur CMOS-Technologie gekommen sein. Dies gilt sowohl für bestehende Systeme, als auch für neu zu entwickelnde Systeme:

1. Möchte ich eine Steigerung der Performance in meinem System durch höhere Bildraten erreichen?
2. Möchte ich eine Steigerung der Performance, um auch bei schwierigen Lichtverhältnissen mehr zu sehen?
3. Stellen Bildstörungen, wie sichtbare Linien, Blooming oder Smearing ein Problem dar?
4. Möchte ich eine Kostenreduzierung bei meinem System erreichen?
5. Ist die bestehende Sensortechnologie abgekündigt oder wird sie kurzfristig abgekündigt?

5. Was ist bei der Integration von neuesten CMOS-basierten Kameras zu beachten?

Ist die Entscheidung für eine Änderung der Sensor-Technologie getroffen, sind ein paar Dinge zu beachten, um eine schnelle und effektive Integration zu ermöglichen: Ein Vorteil: Die komplette, hochkomplexe Sensor-Integration samt Optimierung der Bildqualität gehört zum Kern-Know-how der Hersteller und ist schon erledigt, wenn Sie Ihre CMOS-Kamera in Händen halten. Bei der Auswahl der Kamera muss sich der Anwender nur mit den „äußeren“ Punkten beschäftigen.

Dazu zählen:

5.1 Bestimmung der richtigen Kamera aus benötigter Auflösung, Sensor- und Pixelgröße

In der Praxis beschreibt die Auflösung, wie groß der kleinstmögliche Abstand zwischen zwei Linien oder Punkten sein darf, damit diese in einem Bild immer noch als getrennt voneinander erkannt werden. Was bedeutet es nun konkret, wenn Sie in einem Datenblatt einer Kamera lesen: „2048×1088“? Diese Angabe bezieht sich

auf die Anzahl der Bildpunkte (Pixel) je Zeile, in diesem Fall also 2048 Pixel in der horizontalen Zeile, und 1088 Pixel in der vertikalen Zeile des Bildes. Miteinander multipliziert ergibt das eine Auflösung von 2 228 224 Pixel, sprich 2,2 Megapixel (Millionen Pixel, MP).

Welche Auflösung Sie für Ihre Anwendung benötigen,

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Objektgröße}}{(\text{Größe des zu betrachtenden Objektdetails})}$$

lässt sich recht einfach mithilfe einer Formel ermitteln:

Die benötigte Auflösung hängt also davon ab, welche Details Sie im Bild erkennen wollen.

Sensor- und Pixelgröße

Große Flächen, sowohl beim Sensor als auch beim einzelnen Pixel, bieten mehr Platz zur Aufnahme von Licht. Licht ist das Signal, aus dem der Sensor die Bilddaten generiert und verarbeitet. Je mehr Fläche dafür zur Verfügung steht, desto besser ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), insbesondere bei großen Pixeln mit z. B. 3,5µm. Je besser das SNR, desto höher ist die Bildqualität. Ein guter Wert liegt im Bereich von 42 dB.

Ein weiterer Vorteil eines großen Sensors ist seine große Fläche, auf der viele Pixel, also eine hohe Auflösung, Platz finden. Der eigentliche Vorteil dabei ist, dass die einzelnen Pixel hier immer noch groß genug sind, um ein gutes SNR zu garantieren – im Gegensatz zu kleineren Sensoren, auf denen weniger Fläche für weniger große Pixel zur Verfügung steht.

Denken Sie daran, dass große Sensoren und viele, große Pixel ohne die entsprechende Optik nur die halbe Miete sind. Sie schöpfen ihre volle Leistungsfähigkeit nur in Kombination mit einem passenden Objektiv aus, das diese hohe Auflösung gleichermaßen abbilden kann. Außerdem sind große Sensoren auch immer kostenintensiver, denn mehr Fläche benötigt gleichzeitig auch mehr Silizium.

5.2 Definition des benötigten Kamera-Interfaces

Diese Entscheidung hängt u.a. von der benötigten Kabellänge, Bandbreite, den Geschwindigkeits- und Echt-Zeit-Anforderungen und der Verfügbarkeit der PC-Hardware, ab.

Wichtig ist dabei, dass viele CMOS-Sensoren eine hohe Datenrate ermöglichen und daher eine große Bandbreite benötigen. Soweit möglich sollte deshalb auch ein Kamera-Interface ausgewählt werden, das eine hohe Bandbreite unterstützt und trotzdem eine kostengünstige Infrastruktur hat (z.B. GigE oder USB 3.0). Dann bleibt das System auch für die Zukunft gerüstet, wenn höhere Frameraten die Performance noch einmal steigern sollen.

³ Generische Ansteuerungsmöglichkeit der digitalen Kamera

Nachfolgend finden Sie eine prägnante grafische Übersicht zu den aktuellen Kameraschnittstellen mit Ihren Vor- und Nachteilen.

Interface	Kabel-länge in m	Bandbreite max. in MB/s.	Multi-Kamera	Kabel-Kosten	„Real-time“	„Plug & Play“
USB 2.0	5	40	■	■	■	■
FireWire	4.5	64	■	■	■	■
GigE VISION	100	100	■	■	■	■
USB VISION	8	350	■	■	■	■
CAMERA Link	10	850	■	■	■	■

Abbildung 6: Die verschiedenen Interfaces im Überblick

Für weitere Informationen zum Thema Kamera-Interfaces, lesen Sie unser White Paper [„Vergleich der gängigsten digitalen Schnittstellentechnologien in der industriellen Bildverarbeitung.“](#)

GigE und USB 3.0 werden für einige Zeit die Schnittstellenlandschaft dominieren und damit auch bei einem Schwenk auf CMOS die beste Wahl für einen Großteil der Anwendungen sein.

5.3 Auswahl von Objektiv und Beleuchtung

Entscheidet man sich für ein neues Sensorformat, muss u. U. auch ein neues Objektiv beschafft werden. Auch die Beleuchtung muss evtl. angepasst werden, wenn der neue Sensor eine andere Empfindlichkeit aufweist. In vielen Fällen ist es auch hier heutzutage möglich die Leistung zu steigern und die Kosten dabei zu senken. So ermöglichen kleinere Pixelgrößen auch kleinere Objektivformate, die wiederum zu günstigeren Preisen (so lange auch die „optische“ Auflösung passt) erhältlich sind. Ein Beispiel sind 1/2" Objektive, die über 5 MP Auflösung ermöglichen.

5.4 Integrationsaufwand für Software und Kamera-Ansteuerung

Kameras, die einem gängigen Standard, wie z.B. „GenICam“³ oder Interface-Standards wie USB3 Vision oder GigE Vision folgen, sind in der Regel einfach zu integrieren. Unter Umständen kann die bisherige Programmierung aufrechterhalten und nur notwendige Aufnahmeparameter angepasst werden. Falls die bisherige Lösung keinem Standard entsprach, ist die Integration zwar etwas aufwendiger, aber es kann sich lohnen, sie trotzdem anzugehen: Die neue Lösung wird so zukunfts-

sicher, da jederzeit auch andere Kameras mit geringerem Aufwand eingebunden werden können.

5.5 Auswahl der richtigen Nachfolge-Kamera

Mit dieser Checkliste können Sie auf die Suche nach der richtigen CMOS-Kamera gehen. Dabei sollten Sie gegenüber Ihrer alten CCD-Lösung auf folgende Punkte achten:

- **Optisches Format und Pixelgröße**
Sollte gleich bleiben, wenn kein Objektivwechsel gewünscht ist. Kann kleiner sein, wenn Empfindlichkeit höher ist und Objektivwechsel möglich.
- **Framerate**
Sollte idealerweise höher sein (um Performance-Verbesserungen im System zu erzielen)
- **EMVA1288-Daten**
Sollten gleich oder besser sein⁴
- **Empfindlichkeit / Wellenlänge**
Sollte ähnlich sein, wenn die Beleuchtung nicht angepasst werden kann.
- **Baugröße der Kamera**
Sollte gleich oder kleiner sein
- **In-Kamera Firmware-Funktionen**
Diese sollten im Detail verglichen werden, falls bislang besondere Firmware-Funktionen genutzt wurden. Üblicherweise bieten moderne CMOS-basierte Kameras mehr Funktionen an: Beispiele sind Nachschärfungs- oder Entrauschungsalgorithmen
- **Software und Programmierung**
Falls vorher mit standardkonformer Software (z.B. GenICam und GigE Vision)) gearbeitet wurde, sollte auf gleiche Kompatibilität geachtet werden, um möglichst wenig Anpassungen an der Programmierung vornehmen zu müssen. Falls proprietäre Software zum Einsatz kam, sollte mehr Zeit für Programmieranpassungen berücksichtigt werden. Zudem empfiehlt sich dann der Wechsel auf standardkonforme Software.
- **Kameraschnittstelle**
Gleiche Schnittstelle, wenn USB 3.0 oder GigE; bei älteren Schnittstellen sollte über einen Wechsel nachgedacht werden, um die Systemkosten zu senken bzw. ein zukunftssichereres Design zu haben.

Bei all diesen Fragestellungen können Tools helfen, um die optimale CMOS-Nachfolgekamera für eine CCD-Kamera zu finden. So bietet Basler beispielsweise auf seiner Webseite ein einfaches Auswahltool, mit dem Sie Ihren aktuellen CCD-Sensor von Sony auswählen können. Außerdem erhalten Sie Empfehlungen für passende Ersatzmodelle. Alternativ können Sie auch den Kamera-Selektor nutzen, der die Auswahl einer CMOS-Kamera anhand von Kriterien, wie Optischen Format oder Frameraten sehr einfach macht.

6. Fazit

Modere CMOS-Sensoren sind gegenüber Multi-Tap CCD- oder Standard-CCD-Sensoren meist überlegen. Und das nicht nur im Hinblick auf den Preis, sondern auch wegen eindeutiger technischer Vorteile, wie höherer Geschwindigkeiten, hoher Auflösung, weniger Bildstörungen oder geringerer Wärmeentwicklung und mit den neuesten Sensorgenerationen auch in Sachen Bildqualität. Auch die Integration von neuen CMOS-basierten Kameras als Austausch oder Alternative zu CCD-Sensoren kann sich einfach gestalten, insbesondere wenn der Anwender standardkonforme Hardware und Software wählt. Für Ihre Anwendung bedeutet dies, dass beispielsweise der Durchsatz an inspizierten Teilen deutlich steigen kann, und das bei deutlich geringeren Kosten für Kamera und Inspektionsanlage und ohne das Sie dabei Abstriche in der Bildqualität machen müssen.

⁴EMVA1288-Daten stellen eine gute Möglichkeit dar, die wesentlichen Bildgebungseigenschaften eines Sensors bzw. einer Kamera zu vergleichen



Autor

René von Fintel

Head of Product Management
Mainstream

René von Fintel ist verantwortlich für die Basler ace Kameraplattform und koordiniert die Markteinführung neuer Technologien wie USB3 Vision. Nach seinem Abschluss in

Wirtschaftsingenieurswesen arbeitete er acht Jahre lang im Vertrieb und Marketing eines bekannten deutschen Unternehmens der Medizintechnologie. Seit 2012 ist René von Fintel im Produktmanagement bei Basler tätig.

Kontakt

René von Fintel
Head of Product Management Mainstream

Tel. +49 4102 463 332
Fax + 49 4102 463 46 332
E-Mail: rene.vonfintel@baslerweb.com

Basler AG
An der Strusbek 60-62
22926 Ahrensburg
Deutschland

Über Basler

Basler ist ein international führender Hersteller von hochwertigen digitalen Kameras und Zubehör für Anwendungen in Fabrikautomation, Medizin, Verkehr und einer Vielzahl von weiteren Märkten. Das Produktportfolio umfasst Flächen- und Zeilenkameras in kompakten Gehäusegrößen, Kameramodule als Boardlevel-Varianten für Embedded Vision-Lösungen sowie 3D-Kameras. Abgerundet wird das Angebot durch unser bedienerfreundliches pylon SDK sowie eine breites Spektrum von teils eigens entwickeltem Zubehör, das optimal auf unsere Kameras abgestimmt ist.

Basler verfügt über drei Jahrzehnte Erfahrung im Bereich der Computer Vision. Das Unternehmen beschäftigt rund 500 Mitarbeiter an seinem Hauptsitz in Ahrensburg sowie in Niederlassungen und Vertriebsbüros in Europa, Asien und Nordamerika.