

# **Bildsensoren**

Material für die Gruppenarbeit BOS12

## **CMOS**

### **OSZ Handel I**

Alexander Baldauf (Student Master of Education)

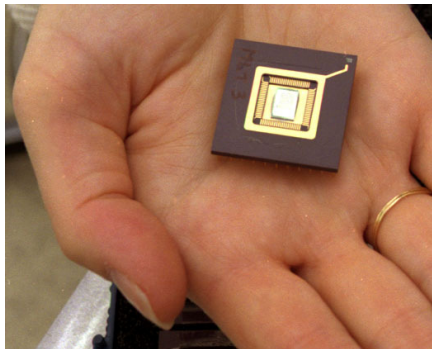
[baldauf@informatik.hu-berlin.de](mailto:baldauf@informatik.hu-berlin.de)

27.02.2009

# Active Pixel Sensor

Ein **Active Pixel Sensor** (APS, dt. *aktiver Pixelsensor*) ist ein Halbleiterdetektor zur Lichtmessung, der in CMOS-Technologie gefertigt ist und deshalb oft als **CMOS-Sensor** bezeichnet wird.

Durch die Verwendung der CMOS-Technologie wird es möglich, weitere Funktionen in den Sensorchip zu integrieren, wie beispielsweise die Belichtungskontrolle, die Kontrastkorrektur oder die Analog-Digital-Wandlung.



Einer der ersten CMOS-APS, eine Entwicklung der NASA

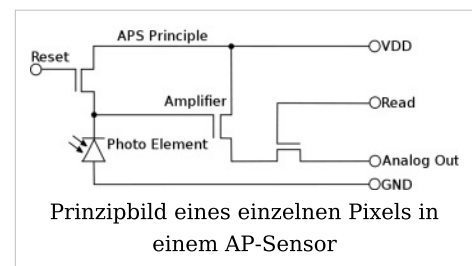
## Funktionsprinzip

Die Lichtempfindlichkeit der APS basiert – wie auch der CCD-Sensoren – auf dem inneren fotoelektrischen Effekt.

Zu jeder Fotodiode ist ein Kondensator parallel geschaltet, der durch den Fotostrom aufgeladen wird. Die Spannung ist proportional zur Helligkeit und zur Belichtungszeit. Im Gegensatz zu CCDs werden die bei

der Belichtung angesammelten Elektronen nicht zu einem einzigen Ausleseverstärker verschoben, sondern jedem einzelnen Bildelement ist ein Verstärker zugeordnet, der diese Kondensatorspannung dem Analogsignalprozessor direkt zur Verfügung stellt.

Das bedeutet, dass jedes Bildelement zusätzlich zur Fotodiode eine Vielzahl von Transistoren enthält, die die gesammelte Ladung in eine messbare Spannung umwandeln. Der Vorteil ist, dass die Elektronik direkt das Spannungssignal jedes einzelnen Pixels auslesen kann, ohne die Ladungen verschieben zu müssen, was eine deutlich geringere Neigung zum Blooming zur Folge hat. Der Nachteil ist, dass sich zwischen den lichtempfindlichen Fotodioden viel Elektronik befindet, die selbst nicht lichtempfindlich ist, was bei gleicher Chipfläche ursprünglich zu einer im Verhältnis zur CCD-Technologie kleineren Lichtempfindlichkeit führte. Da die notwendige Integrationsdichte, um mit CCD konkurrenzfähig zu sein, noch nicht erreicht war, war diese Technologie in den 1970er und 1980er Jahren noch bedeutungslos.



## Geschichte

Wegen der anfänglich nur schlecht verkleinerbaren Ausleseelektronik lag der Füllfaktor, also der Anteil der lichtempfindlichen Fläche an der Gesamtfläche eines Pixels, bei nur 30 Prozent, d. h. die Ladungsausbeute war gering (somit auch die erzielbare Signalstärke), was zu einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis führte und sich in starkem Bildrauschen bei schlechter Lichtempfindlichkeit äußerte.

Diese Nachteile wurden erst später durch intensive Weiterentwicklung in der Miniaturisierung der CMOS-Technologie und durch den Einsatz von Mikrolinsen über jedem Bildelement, die das gesamte einfallende Licht auf den lichtempfindlichen Teil lenken, reduziert.

## Anwendungsgebiete

AP-Sensoren werden als Bildsensoren in digitalen Fotoapparaten und Videokameras eingesetzt.

So kommen heute AP-Sensoren in verschiedenen digitalen Spiegelreflexkameras zum Einsatz. In Mobiltelefonen mit Kamerafunktion kommen praktisch ausschließlich AP-Sensoren zum Einsatz.

In Camcordern werden momentan fast ausschließlich CCD-Sensoren eingesetzt, jedoch hat Sony 2005 den HDR-HC1 veröffentlicht, einen HDV-Camcorder der einen APS verwendet. APS finden auch in vielen Industriekameras Verwendung. Die Münchener Firma Arri brachte 2004 mit der D-20 eine Videokamera heraus, die einen APS mit einer Bildauflösung von  $2880 \times 1620$  Pixel verwendet. Seine Größe entspricht der aktiven Bildfläche eines 35-mm-Films, was den Einsatz von generischen Filmobjektiven erlauben und die Schärfentiefe der Bilder an die des Filmes angleichen soll.

Eine Spezialform der CMOS-Bildsensoren stellen die Fotodioden-Arrays dar, die quasi ein  $n \times 1$ -CMOS-Bildsensor sind. Sie werden in der Regel nur in embedded-Anwendungen, d. h. Anwendungen, bei denen das Bild nicht von Menschen betrachtet oder ausgewertet wird, verwendet. Beispiele dafür sind Barcodelesegeräte und Winkelsensoren.

## Unterschiede zu CCD-Sensoren

Die CMOS-Technologie der APS weist gegenüber den MOSFET-basierten CCD-Sensoren auch einen deutlich geringeren Energieverbrauch auf (ca. zehn Prozent der CCDs) und erlaubt bei einem größeren Produktionsvolumen eine günstige Produktion, da sie ohne Umrüstung auf den für hohe Stückzahlen ausgelegten Fertigungsstraßen gefertigt werden kann und so einen geringeren Fertigungsaufwand pro Chip verursacht.

Ein weiterer Unterschied ist die geringere UV- und IR-Empfindlichkeit. Dies führt zum einen dazu, dass bei der Anwendung in einer Fotokamera weniger Bildstörungen durch UV-/IR-Strahlung auftreten, hat aber auch den Nachteil, dass man gewöhnliche CMOS-Sensoren nicht für IR-Kameras (z. B. Überwachungskameras) einsetzen kann.

## Vorteile

- Geringerer Stromverbrauch.
- Bei großen Stückzahlen billiger herzustellen.
- Es lassen sich mehrere Pixel gleichzeitig auslesen.
- Die Auslesesteuerung kann direkt auf dem Sensor integriert werden (*System on a Chip*).
- Kaum Blooming.
- Flexibler auszulesen (schneller Preview, Video, Binning, mehrfaches Auslesen).
- Manche Verarbeitungsschritte können gleich im Pixel-Verstärker vorgenommen werden, z. B. Logarithmierung beim HDRC-Sensor (*high dynamic range CMOS*).
- Sehr hohe Bildraten im Vergleich zu einem CCD selber Größe.

## Nachteile

- geringerer *Füllfaktor* (Verhältnis der fotoempfindlichen zur gesamten Pixelfläche)
- größere Empfindlichkeitsunterschiede zwischen den Pixeln, was bei Bayer-Sensoren zu einem stärkeren Farbrauschen führt.
- übliche CMOS-Sensoren sind weniger lichtempfindlich als CCD-Sensoren (Ausnahme: teure Speziialsensoren)

## Siehe auch

- Foveon X3 Direkt-Bildsensor
- Rolling-Shutter-Effekt
- Digital Pixel Sensor (DPS)

## Weblinks

- Wissenswertes zu Bildsensoren <sup>[1]</sup>
- Sensortechnik <sup>[2]</sup>
- Common Image Sensor Sizes <sup>[3]</sup>
- APS in der Mikroskopie mit Bild eines APS-Dies <sup>[4]</sup>
- [[http:// www. informatik. hu-berlin. de/ ~goehring/ papers/ ccd-vs-cmos. pdf](http://www.informatik.hu-berlin.de/~goehring/papers/ccd-vs-cmos.pdf) Seminararbeit *Digitalkameratechnologien: Eine vergleichende Betrachtung CCD kontra CMOS*] (PDF)
  - Diplomarbeit von J. Anhofer <sup>[5]</sup> (PDF - Seite 49 bis 53, mit sehr gutem 3D-Schnittbildern)
  - Messen optischer Größen <sup>[6]</sup> (PPT - Bilder zur Veranschaulichung)
  - Canon Deutschland zur Weiterentwicklung der CMOS-Technologie <sup>[7]</sup> für die Canon EOS 350D
- [[http://www.s-t-e.de/content/Articles/Articles\\_14.php](http://www.s-t-e.de/content/Articles/Articles_14.php) Artikel *17 Bit für jedes Pixel* über eine neue Generation von CMOS-Bildsensoren mit hoher Dynamik]

## 4. CMOS – Gegensätzliche verschaltete Transistoren

### 4.1 Kurzer historischer Abriss

Die grundlegende Idee der CMOS - Digitalkameras besteht darin, jeden Bildpunkt separat zu verdrahten und somit ansprechen zu können. Die Idee für derartige Bilderfassungssysteme entstand bereits in den 70er Jahren. Leider waren die technischen Bedingungen für eine effektive Herstellung der dazu erforderlichen Schaltungen damals nicht vorhanden. Auch bei den hergestellten Prototypen ließ die Bildqualität sehr zu wünschen übrig. Diese und weitere Probleme konnten damals noch nicht befriedigend gelöst werden. Das war auch der Hauptgrund für die Bedeutungslosigkeit dieser Technologie bis Ende der 80er Jahre.

### 4.2. Aufbau eines CMOS – Sensors

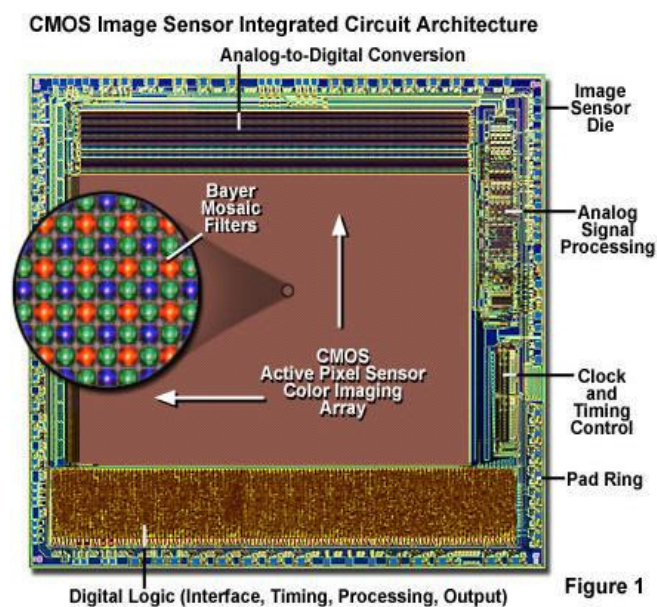


Abb. 4.1.

Einen großen Vorteil, den CMOS -Bildsensoren gegenüber ihren CCD -Gegenspielern haben, ist die Fähigkeit, eine Vielzahl von Verarbeitungsschritten und Kontrollfunktionen, die über das Sammeln von Photonen deutlich hinausgehen, parallel auszuführen bzw. direkt auf dem Chip zu implementieren. Hierunter fallen meist Timing, Analog – Digital – Wandlung (ADC), Bildkontrolle, Verschlussautomatik (Shuttering), Taktung, Weißabgleich sowie erste Bildverarbeitungsschritte. Weil der CMOS – Chip all diese Funktionen ausführen soll, ähnelt seine Architektur mehr der eines RAM-Chips als er eines einfachen Bilderfassungschips.

Die bekanntesten CMOS – Architekturen basieren auf „Aktiven Pixel Sensoren“ (APS) – Technologien, bei denen sowohl die Fotodiode als auch die Ausleseelektronik für jeden Pixel kombiniert vorkommen. Dies erlaubt, das Ladungspaket, das auf der Fotodiode gesammelt wird, noch im Pixel auszuwerten und in eine Spannung umzuwandeln, um sie dann in fortlaufenden Spalten und Zeilen zum Analogsignalprozessor des Chips weiterzuleiten.

Somit enthält jeder Pixel (oder jedes Bildelement) zusätzlich zur Fotodiode noch eine Vielzahl von Transistoren, die gesammelte Elektronenladungen in eine messbare Spannung umwandeln. Im weiteren zeitlichen Verlauf des Auslesevorgangs wird die Fotodiode

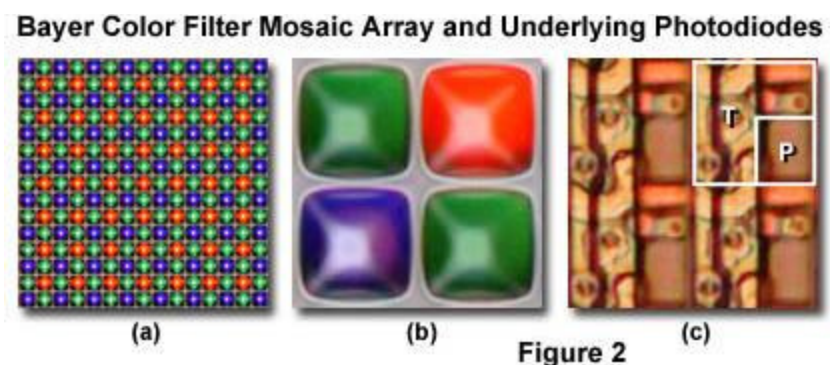
neugestartet und die Spannung auf den vertikalen Spaltenbus übertragen. Das daraus resultierende Feld ist mit einem organisierten Schachbrett mit metallischen Auslesebussen vergleichbar, dass an jeder Kreuzung eine Fotodiode mit Signalverarbeitungselektronik enthält. Der Bus leitet die Leseanfrage an die Fotodioden weiter und bringt die Ausleseinformation zurück zum Analogdekoder und –prozessor, der sich entfernt vom Aufnahme-feld auf dem Chip befinden kann. Diese Technik erlaubt es, jeden Pixel des Feldes direkt zu adressieren und auszulesen, was mit der CCD- Technologie von heute noch nicht möglich ist.

Abb. 4.2.

(a) Ausschnitt aus dem Pixelfeld

(b) vier Pixel sind notwendig, um ein Farbbild zu erfassen

(c) Busleitungen



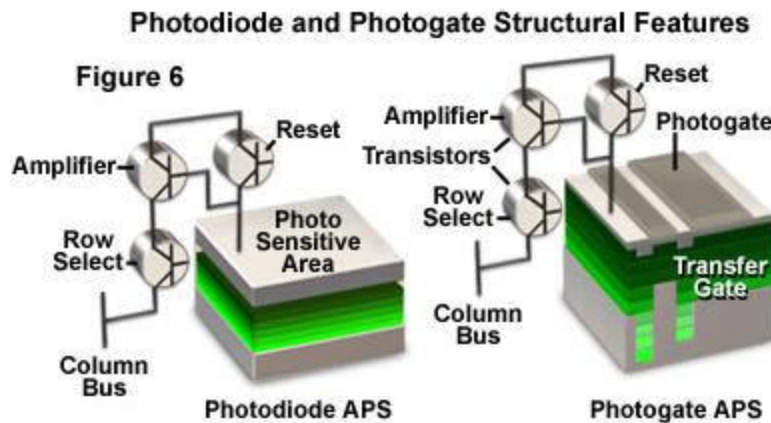
Die Architektur eines typischen CMOS – Bildsensors ist in Abbildung 4.1. dargestellt. Es zeigt einen Schaltkreis für Bilder mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln. Das Fotodiodenfeld ist von einer geordneten Schicht aus roten, grünen und blauen Filtern überzogen, jeweils einem pro Sensor (genauso wie bei CCD – Chips). Außerdem befindet sich eine **Mikrolinse** über jedem Bildpunkt, um die Lichtausbeute zu erhöhen. Diese Architektur wird oft auch bei CCD – Geräten angewandt. Die Analogsignale eines jeden Bildpunktes werden noch auf dem Chip digitalisiert.

Neben vielen anderen Aufgaben eines CMOS – Bildsensors hat der Chip die Taktung für die schrittweise Ladungsgenerierung vorzunehmen. Er steuert des Weiteren das Auslesen der Spannung, den Transport der Signale, Messaufgaben sowie Bildverarbeitung und Ausgabe des Bildes.

Die verschiedenen Farbfilter rot, grün und blau (Abb. 4.2.b) auf den Fotodioden haben die Aufgabe, einzelne Farbkomponenten des eintreffenden Bildes zu erfassen. Wie man sieht, gibt es doppelt so viele grüne Pixel wie rote bzw. blaue, was u. a. damit zusammenhängt, dass das menschliche Auge für grünes Licht (bei ca. 550 nm) am empfindlichsten ist.

In Abb. 4.2.b erkennt man die kleinen Linsen (Kapitel 5.3.), die auf jeden Farbfilter aufgebracht wurden. Abb. 4.2.c zeigt vier komplette Pixeleinheiten. Man erkennt die zwei weißen Quadrate mit den Buchstaben **P** und **T**. Das **P** - Quadrat beschreibt den Bereich, in dem Licht gesammelt wird. Der **T** - Bereich enthält die Unterstützungslogik (Transistoren). Wie man weiterhin erkennt, beanspruchen allein die unterstützenden Elemente in jedem Pixel ca. 70% der Fläche. Diese Fläche ist blind für die Erfassung von Photonen. Lediglich die verbleibenden 30% Fläche repräsentieren den lichtempfindlichen Teil eines Pixels. Wegen





Einige Verfahren der CCD-Technologie werden mit Fotogatepixelsensoren umgesetzt, um Rauschen zu unterdrücken und die Bildqualität zu verbessern (z.B. Doppelabtastungen). Hier wird die Diode in zwei Schritten ausgelesen, und im Anschluss daran das eine Bild vom anderen abgezogen, um niederfrequentes Rauschen zu unterdrücken. Beide CMOS - Technologien sind sehr energiesparend.

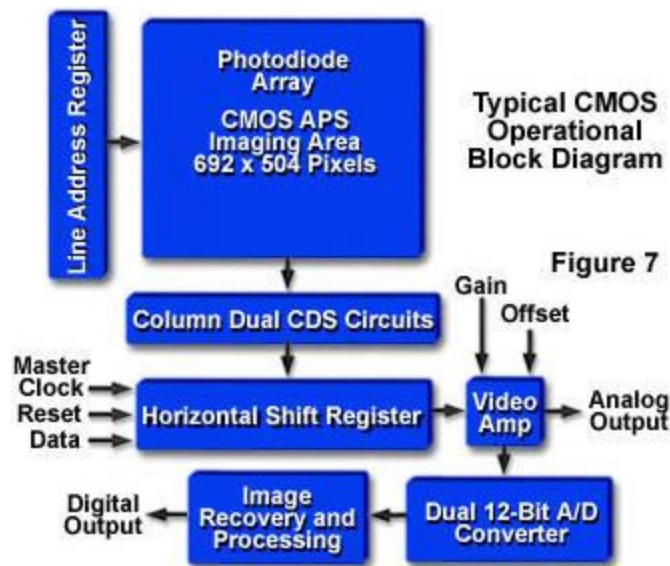


Abb. 4.4.

*Blockschaltbild der Aktivitäten, die eine CMOS – Kamera auszuführen hat, um ein Bild zu generieren*

CMOS - Bildsensoren besitzen außerdem oft Entzerrungsfunktionen, den Schwarz – Weiß – Abgleich, Glättung, Schärfung, Farbausgleich, Aperturkorrektur sowie Funktionen der Gammakorrektur. Bei manchen Geräten ist auch eine Bildstabilisierung (Anti-Jitter) vorzufinden.

Weil CMOS – Bildsensoren einzelne Bildpunkte direkt ansprechen können, verfügen sie über die Fähigkeit, nur einen kleinen Teil aller Pixel, z.B. einen Bildausschnitt auszulesen. Diese Technik ist unter dem Namen „Windowing“ bekannt. Damit werden die Bildverarbeitungsmöglichkeiten mit diesen Sensoren deutlich erweitert. Windowing wird durch die Taktungsschaltkreise direkt auf dem Chip kontrolliert. Man kann somit bestimmte Bereiche eines Bildes mit sehr hoher Bildwiederholrate kontrollieren.

Bildfrequenzen von 30 bis 60 fps <sup>\*2)</sup> sind üblich; spezielle Hochgeschwindigkeitskameras können sogar bis zu 1000 fps erreichen. Man braucht allerdings Zusatzhardware, um dem hohen Datenaufkommen gerecht zu werden.

CMOS – Sensoren können verschiedene Auslesefunktionen realisieren, z.B. Progressive Scan, also geordnetes zeilen- und spaltenweises Auslesen, oder Interlaced Scan, wobei erst die ungeraden und später die geraden Zeilennummern ausgelesen werden.

CMOS Sensoren können mit herkömmlichen Chipproduktionsverfahren hergestellt werden. Der Vorteil ist die vollständige Implementation der Fotodiode sowie der gesamten Steuerelektronik auf einem Chip. Dabei profitieren CMOS-Sensoren von Prozessoptimierungen und Fortschritten, die auf Chipebene z.B. für RAM-Bauteile gemacht werden. Dennoch muss der Produktionsprozess für CMOS – Chips, um rauscharme Geräte mit hoher Leistung herstellen zu können, meist angepasst werden, da sonst das Dunkelrauschen bei immer kleiner werdenden Chips im Verhältnis zum Signal zu stark ansteigt.

Profitiert haben CMOS – Geräte von immer kleiner werdenden Pixelgrößen, die allein in den letzten zehn Jahren von 10-20 Mikron auf 4-5 Mikron gesunken sind. Noch weitere Reduktionen sind erforderlich, um Bilder im Multimegapixelbereich erfassen zu können.

Die Anwendungsbereiche für CMOS – Geräte sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Wegen ihrer Fähigkeit, sehr hohe Bildwiederholraten zu ermöglichen, benutzt man CMOS – Sensoren aktuell besonders verstärkt für die Industrie, das Militär, für Flusskontrollen und medizinische Diagnosen.

<sup>2)</sup> fps steht für „frames per second“ und bedeutet sinngemäß übersetzt „Bilder pro Sekunde“



## **6. Vergleich von CCD mit CMOS, Vorzüge, Nachteile, Probleme**

Die Frage danach, welche von beiden Technologien nun besser sei, ist wie die Frage nach der Verträglichkeit von Äpfeln und Birnen. Beide sind jedenfalls gesund.

Bildsensoren, basierend auf CCD - und CMOS – Technologien, sind zwei verschiedene Arten von Geräten, die Bilder digital aufnehmen. Sie werden oft als Konkurrenten angesehen, aber CCD und CMOS Aufnahmegeräte haben verschiedene Stärken und Schwächen. Dies macht sie unterschiedlich gut geeignet für verschiedene Anwendungen. Welche Technologie man benutzt, hängt von der jeweiligen Anwendung ab.

CCDs sind seit 1970 die dominanten Bildaufnahmegeräte, hauptsächlich weil CCDs die beste Bildqualität mit der damaligen Produktionstechnologie bereitstellten. CMOS Bildsensoren waren nicht so vielseitig und ihre Produktion hätte kleinere Bestandteile, als sie von den damaligen Wafer-Mastern bereitgestellt werden konnten, gefordert.

Erst heute hat sich die Halbleiterindustrie soweit entwickelt, dass die Produktion von Bilderfassungssystemen auf CMOS-Basis günstig und sinnvoll für den mittleren Leistungsbereich der Bilderfassungsanwendungen ist.

### **Stärken von CCD - Kameras**

In einem CCD Sensor wird die Ladung eines jeden Pixels durch eine sehr begrenzte Anzahl von Ausgangsknoten geleitet, um dort in bestimmte Spannungen umgewandelt und nach einer kurzen Pufferung als analoges Signal weitergeleitet zu werden. Die Ausgangsuniformität und Bildqualität sind bei CCD-Sensoren sehr hoch, weil die Ladungen von wenigen Verstärkern in Spannungen umgewandelt werden. Diese weisen durch ihre geringe Anzahl nur geringe Schwankungen auf.

Die Lichtausbeute ist aufgrund der hohen Aperturen sehr hoch. Es sind keine oder nur wenige lichtunempfindliche Bauteile auf der Chipoberfläche vorhanden. Eine hohe Lichtempfindlichkeit trägt auch zu einer hohen Dynamik bei. CCDs finden eine große Anwendung in der Medizin, der Wissenschaft und der Industrie, wo Bildqualität wichtiger als geringer Platzbedarf ist.

### **Stärken von CMOS - Kameras**

CMOS-Kameras bestechen zuallererst durch ihre geringen Baugrößen. Die meisten Funktionen können auf Chiplevel implementiert werden, und die Verdrahtung außerhalb des Chips ist sehr gering (Off Chip Circuitry). Jeder Pixel vollzieht selbst die Umwandlung von Ladungen in Spannungen. Die Digitalisierung erfolgt schon auf dem Chip. Der Stromverbrauch des Chips ist sehr gering. Bloomingeffekte treten wegen der sofortigen Umwandlung der Ladungen in Spannungen nicht auf. Zudem können einzelne Bildbereiche direkt adressiert werden und mit sehr hohen Bildwiederholraten ausgelesen werden. CMOS – Systeme können in hohen Stückzahlen sehr günstig produziert werden. Ihre Anwendung findet überall dort statt, wo es weniger auf Bildqualität als auf Platzsparsamkeit ankommt, beispielsweise bei Überwachungskameras, Webcams, Spielsachen, Faxgeräten und einigen Fahrzeuganwendungen.

### **Schwächen von CCD - Kameras**

Bloomingeffekte müssen auf Kosten der Aperturgrößen behoben werden. Ein direktes Adressieren von Bildbereichen ist nicht möglich. Die Nachverarbeitungsmodule nehmen viel Platz ein und machen sich in den größeren Abmessungen der Kamera bemerkbar.

### **Schwächen von CMOS - Kameras**

Weil jeder Bildpunkt die Umwandlung der gesammelten Ladungen selbst vollzieht und die einzelnen Bauelemente nicht völlig identisch arbeiten, kommt es zu herstellungsbedingten Schwankungen des Ladungs-pro-Spannungsverhältnisses. Die Einheitlichkeit von gleichfarbigen Bereichen (**Uniformität**) des Bildes nimmt ab. Die Vielzahl von Steuerschaltkreisen auf Chipebene macht sich in einer schlechteren Lichtempfindlichkeit bemerkbar. Rauscheffekte sind höher als bei CCDs. Ein weiteres Problem für die Verbreitung von CMOS - Geräten ist wirtschaftlicher Natur und hängt mit der Zuverlässigkeit der Anbieter zusammen. Viele CMOS-Anbieter kämpfen mit einem hohen finanziellen Risiko um Marktanteile und gehen dabei sehr oft Bankrott. Kunden sind daher vorsichtig, an solche Firmen große Aufträge zu vergeben. Die Entwicklungszeiten von CMOS – Systemen liegen mit 18 Monaten zudem deutlich über denen von CCDs mit 8 Monaten und werden in Zukunft eher noch ansteigen.

Die Kosten auf dem Chiplevel sind ungefähr gleich. Frühere CMOS-Verfechter behaupteten, dass CMOS – Geräte viel billiger seien, weil sie auf denselben hochvolumenbasierten Wafer-Fertigungsanlagen hergestellt werden könnten wie gebräuchlichen Logik- oder Speicherchips. Das war allerdings nicht der Fall. Der schwierige Herstellungsprozess für Chips mit guter Bildqualität hat dazu geführt, dass CMOS – Systeme immer noch sehr spezialisiert sind und in niedrigen Stückzahlen produziert werden. CMOS – Systeme erfordern zudem wegen der vielen Chipfunktionen mehr Silizium pro Pixel. CMOS – Kameras brauchen zwar weniger Komponenten und weniger Strom auf der Chipebene, aber sie bedürfen auch noch nachverarbeitender Schaltkreise, um die geringere Bildqualität zu kompensieren.

Im Folgenden werden die wichtigsten Merkmals- und Leistungskriterien für digitale Bilderfassungsgeräte aufgeführt:

#### **6.1. Reaktivität**

Die Reaktivität ist definiert als die Stärke des Signals, das am Sensor entsteht, wenn man eine bestimmte Menge an optischer Energie hineinbringt. CMOS – Geräte haben hier gegenüber CCDs geringe Vorteile, weil die Lichtauffangelemente einfacher in einem CMOS – Sensor zu platzieren sind. Die komplementären Transistoren erlauben eine hohe Umwandlungsrate, bei wenig Versorgungsspannung, wohingegen die CCD – Verstärkung einen hohen Stromverbrauch mit sich bringt. Einige CCD – Hersteller versuchen, durch neue Technologien der Ausleseverstärkung den Stromverbrauch zu senken.

## **6.2. Dynamik**

Als Dynamik wird das Verhältnis von der Sättigungsgrenze eines Pixels zu seiner Lichtempfindlichkeit bezeichnet. Dieses Kriterium spricht für CCDs, die unter gleichen Umständen ungefähr die doppelte Dynamik wie CMOS – Sensoren besitzen. CCDs sind zudem wegen vorteilhafterer Sensorsubstrate (weniger Verdrahtungen auf dem Chip) rauschärmer als CMOS – Sensoren, toleranter für Busspannungsschwankungen und können, weil sie nur wenige Verstärkungstransistoren benötigen, sehr rauscharme Transistoren mit etwas höheren Ausmaßen verwenden. Auch wenn man bei CMOS - Systemen mit äußerer Bildkühlung, einer hohen Auflösung, besseren Optik und externer Elektronik arbeitet, kann man die Bildqualität von CCD-Systemen (noch) nicht erreichen.

## **6.3 Uniformität**

Die Beständigkeit der Lichtempfindlichkeit zwischen verschiedenen Pixeln unter gleichen Belichtungsverhältnissen. Ideales Verhalten wäre hier eine absolute Gleichheit. Aber minimale Wafer-Unterschiede, verursacht durch die Herstellung, Minimale Defekte und Verstärkungsunterschiede beeinträchtigen die Uniformität. Es ist wichtig, hierbei zwischen Uniformität bei Beleuchtung und Uniformität bei Dunkelheit zu unterscheiden. CMOS – Sensoren waren bisher unter beiden Bedingungen schlechter. Jeder Pixel hat einen eigenen Verstärker, die sich in ihren Charakteristiken beträchtlich voneinander unterscheiden - gerade wegen der Herstellungsdifferenzen. Bei sinkenden Geräteabmessungen verschlimmert sich dieser Effekt. Aber Verstärker, die ihren Ausgang überwachen, können zu höherer Gleichheit beitragen. Somit wurden CMOS – Sensoren in letzter Zeit ähnlich uniform bei Licht, wie CCD - Sensoren. Wegen Offsetvariationen haben CMOS-Systeme aber noch Probleme bei Dunkelheit. Obwohl viele Hersteller auch an diesem Problem arbeiten, wurden noch keine befriedigenden Ergebnisse erzielt. Dies wirkt sich besonders bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen aus, weil hier jedes Bild nur sehr wenig Licht erhält.

## **6.4. Verschluss**

Ist die Möglichkeit, die Belichtung nach Belieben zu starten und zu stoppen. Dies ist ein Merkmal nahezu aller CCDs, speziell von Interline-Transfer-Systemen und besonders wichtig bei maschinellern Sehen. CCDs können bei geringfügiger Verringerung der Apertur bessere elektronische Verschlüsse bereitstellen. Will man elektronische Verschlüsse in CMOS – Systemen implementieren, benötigt man einige Transistoren mehr pro Pixel, was bei Zeilenscannern nicht problematisch ist; man platziert die Transistoren einfach neben die Pixel. Bei Flächenscannern gehen diese Technologien jedoch auf Kosten der Apertur, denn die Transistoren werden dort aufgebracht, wo vorher ein lichtempfindliches Gebiet war. CMOS – Designer haben die folgenden Lösungsansätze entwickelt: „Rolling Shutters“, die verschiedene Zeilen des Bildes zu verschiedenen Zeiten belichten. Dies reduziert die Anzahl der Transistoren pro Pixel und erhöht so den Füllfaktor. Das ist für Einzelkunden teilweise akzeptabel, aber für hochperformante Anwendungen nicht geeignet, weil das Bild dabei verzerrt wird.

Ein uniformer synchroner Verschluss, auch „Nonrolling Shutter“ genannt, belichtet alle Punkte des Bildfeldes zur selben Zeit. Verzerrungen werden vermieden, auf Kosten der

Apertur. Kunden müssen sich zwischen günstigen Geräten mit diesem Nachteil oder teuren Geräten, die größere Pixel haben und somit auch insgesamt umfänglicher sind, entscheiden.

### **6.5. Geschwindigkeit**

Hier hat die CMOS - Technologie einen Vorteil gegenüber CCD – Systemen, weil alle Kamerafunktionen auf dem Bildsensor platziert werden. Signal- und Stromzufuhren sind somit kürzer, mit weniger induktiven-, kapazitiven- und Weiterleitungsverzögerungen. Heute ist der Vorteil von CMOS-Systemen auf diesem Gebiet gegenüber CCDs in den Hintergrund gerückt, weil ein Großteil der Konsumenten nicht so hohe Bildwiederholraten wie die Industrie, die Wissenschaft und die Medizin benötigen.

### **6.6. Windowing**

Eine einzigartige Fähigkeit von CMOS- Geräten ist die Möglichkeit, nur einen Teil des Bildes auszulesen. Diese Fähigkeit rührt daher, dass nur CMOS – Systeme die Bildpunkte einzeln adressieren können. Das erlaubt erhöhte Bild- und Zeilenwiederholfrequenzen für die Gebiete, die von Interesse sind. Man benutzt das z.B. in der Objektverfolgung in kleinen Bereichen des Bildes. CCDs haben im Gegensatz dazu generell nur begrenzte Windowing-Fähigkeiten.

### **6.7. Antiblooming**

Antiblooming beschreibt die Möglichkeit eines Systems, lokale Überbelichtungen abzuführen, ohne den Rest des Bildes dabei zu beeinflussen. Die CMOS -Technologie ist aufgrund ihrer Architektur von Bloomingeffekten nicht betroffen, bei CCDs muss man sich mit speziellen Techniken wie Drains behelfen. Konsumentengeräte haben meist diese Techniken implementiert, wissenschaftliche Systeme jedoch nicht.

### **6.7. Spannung und Taktung**

CMOS – Systeme besitzen hier einen Vorteil, sie benötigen nur geringe Spannungen. Sie kommen mit einer einzigen Spannung und Taktung aus. CCDs benötigen meist mehrere höherer Spannungen, aber die Taktungen wurden in modernen Geräten vereinfacht. Diese arbeiten nun auch schon mit Niedrigspannungstaktgebern.

### **6.8. Zuverlässigkeit**

Beide Chiptypen sind für die meisten Anwendungen gleich zuverlässig. In sehr schwierigen Einsatzgebieten haben CMOS – Sensoren jedoch einen kleinen Vorteil, weil alle Funktionen auf dem Chip implementiert werden können. Lötstellen und Verbindungen, die zu Ausfällen