

CCD-Chip-Technik

Bildaufnahmesysteme

Die Bildaufnahmesysteme erzeugen mit Hilfe des Lichtes ein speicherbares Abbild der Umwelt. Dazu wird entweder ein chemisches oder elektronisches Aufnahmesystem verwendet. Zu den Bildaufnahmesystemen zählen Filmab-taster, Filmkamera und elektronische Filmkamera. Dabei werden wir uns auf die Aufnahmetechnik von elektronischen Filmkameras beschränken. Die Funktionsgrundlagen dieser Kameras besteht in der Umsetzung von Lichtstrahlen in elektrische Signale.

Halbleiterbildwandler

Um Lichtimpulse in elektrische Signale umsetzen zu können wird ein Ladungsträger benötigt, der aus Metall besteht und in einem Halbleitermaterial aus Silizium eingeschlossen ist. Heute werden fast ausschließlich Bildwandler auf Halbleiterbasis verwendet. Mit dem Auftreffen von Licht bzw. Photonenenergie wird der Ladungsträger gehoben. Die Eindringtiefe der Photonen hängt von ihrer Energie und damit von der Wellenlänge des Lichtes ab. Kurzwelliges Licht wird an der Oberfläche absorbiert, langwelliges dringt tiefer in das Material ein. Halbleitermaterialien können p- und n-dotiert sein. Diese Kombination führt zur einer Diode.

Röhrenbildwandler

Der erste elektronische Bildwandler war das Ikonoskop, das ca. 1936 zur Verfügung stand. Bei diesem Gerät wird durch eine fotoelektrische Schicht auf Basis des äußeren Photoeffektes die Aufladung der Bildpunkt-Kondensatoren erreicht. Mit einem Elektronenstrahl werden die erzeugten Bildpunkte ausgelesen. Dieser Bildwandler wurde in den 50er Jahren zum empfindlicheren Superorthikon weiterentwickelt. Danach kam das Vidikon, eine Bildwandlerröhre die ein erheblich einfacheren und leichteren Aufbau aufweist, da diese mit einer Halbleiterschicht arbeitet.

Bis 1983 gab es für die Aufzeichnung von Video nur Aufnahme-Röhren. Plumbicon, Newicon so hießen gängige Röhrentypen. Nach zehnjähriger Entwicklungsarbeit brachte die Firma Hitachi eine erste Kamera heraus, die mit einem CCD-Element arbeitete.

CCD-Bildwandler

Der CCD-Chip (Charge Coupled Device = ladungsgekoppeltes Bauelement) löste die Röhrenbildwandler ab. Das Prinzip des CCD-Chips besteht in seinen Halbleiterbauelementen, die eine geringere Spannung und Leistung benötigen, so wie ein geringeres Gewicht haben. Außerdem sind Halbleiterbauelemente gegenüber den Röhrensystemen viel robuster und unempfindlicher gegen Überbelichtung. Im CCD wird die elektrische Ladung wie Wasser in einer Eimerkette von einer Speicherzelle zur nächsten transportiert. Deswegen wird der CCD-Chip auch als Eimerkettenspeicher bezeichnet.

Die CCD-Zelle

Ein CCD-Chip ist ein Bauelement, welches aus vielen kleinen Metall-Oxid-Halbleitern, den sogenannten MOS-Kondensatoren besteht. MOS ist die Abkürzung für **M**etall **O**xid **S**emiconductor. Die Elektroden in den einzelnen Speicherzellen sind durch die Oxidschicht vom Halbleiter getrennt. Bei elektrischer Spannung an der Elektrode entsteht im Halbleiter eine Potentialsenke, in der sich die Ladung sammelt. Ein CCD ist also ein analoges Bauelement. Die Spannung der Elektrode ist von der Lichtintensität abhängig. Je höher die Lichtstärke um so stärker die Potentialsenke. Ist das höchste Spannungsniveau erreicht fließt die Ladung in die Nachbarzelle. Mit diesem Mechanismus kann die Ladung über die gesamte CCD-Zeile transportiert werden. Der CCD-Chip in Verbindung mit einer Fotodiode ermöglicht es dann Lichtstrahlen nach ihrer Stärke in Spannung und so wieder in Lichtimpulse umzuwandeln.

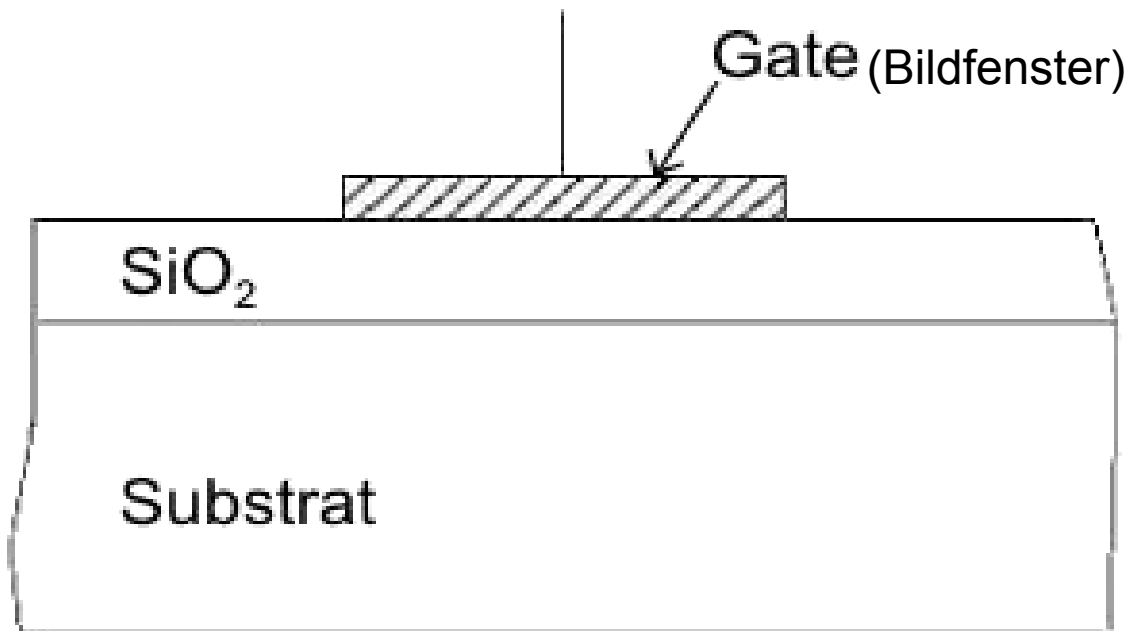
Aufbau eines CCD-Chips

Ein einzelner MOS-Kondensator setzt sich aus einem p-dotierten Siliziumsubstratkörper (d.h. Silizium mit Defektelektronen als Ladungsträger), einer dünnen aufgedampften Schicht Siliziumdioxid (ca. 0,1 μm) und einem sich darauf befindenden Netz transparenter Elektroden, den Gates, aus Aluminium oder polykristallinem Silizium zusammen (siehe schematischer Aufbau eines MOS-Kondensators). Das Siliziumdioxid (SiO_2) wirkt hierbei als Isolierung zwischen den beiden Teilen des Kondensators.

Betrachtet man den gesamten Chip, so sind auf dem Isolator bzw. der Siliziumdioxidschicht rasterförmig Streifen aus polykristallinem Silizium aufgebracht, welche die Reihen der Bildelemente (Pixel, von **Pi[x]cture Element**) bilden. Die letzte Pixelreihe am Rand des Chips dient als serielles Register. Dieses wird benötigt, um gleichzeitig aus jeder Spalte die Ladung eines Pixels als Puffer aufnehmen zu können. Zusätzlich befindet sich noch ein Ausgangsverstärker auf dem Chip, der vor der Digitalisierung von den Ladungspaketen durchlaufen wird.

Der Chip setzt sich somit aus vielen Reihen zusammen, die wiederum aus vielen nebeneinander gesetzten MOS-Kondensatoren bestehen. Er kann deshalb auch als ein zweidimensionales Array von Bildelementen verstanden werden. Die Pixel haben bestimmte geometrische Abmessungen – früher häufig rechteckige, heutzutage meist quadratische.

Die Herstellung von CCD-Chips erfolgt per Maskentechnik.



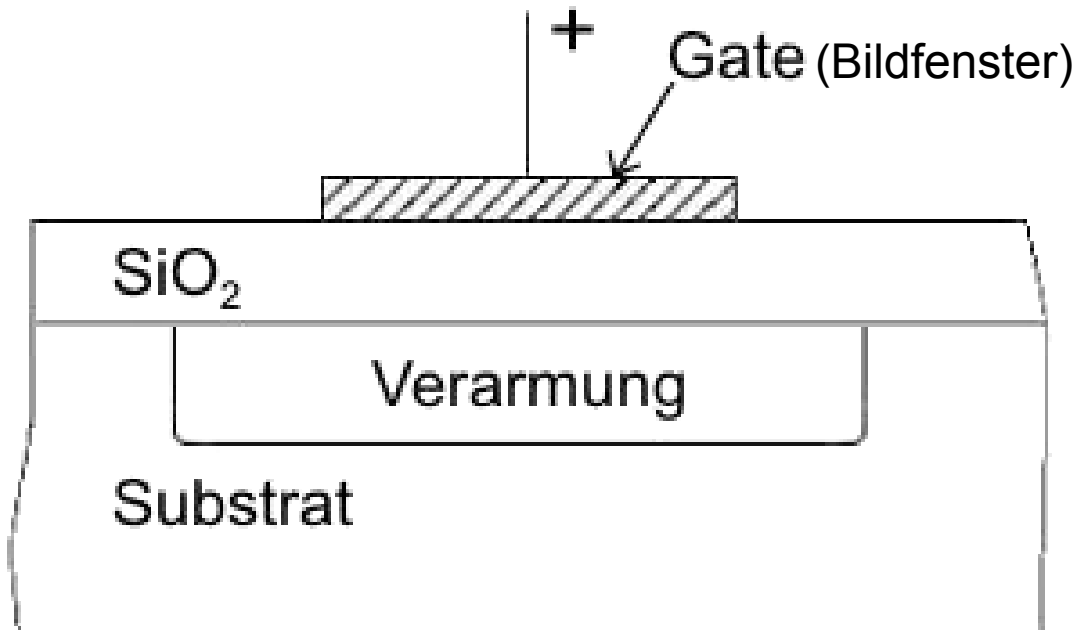
Schematischer Aufbau eines MOS-Kondensators, welcher ein einzelnes Pixel des CCD-Chips darstellt.

Funktionsprinzip und Eigenschaften

Das Funktionsprinzip des CCD-Chips basiert auf dem von Einstein im Jahre 1905 erklärten inneren fotoelektrischen Effekt bei Halbleitern. Die Photonen der auf das Material auftreffenden elektromagnetischen Strahlung lösen mit ihrer Energie Elektronen aus dem Teilchenverbund heraus, die als freie Ladungen im Trägermaterial verbleiben.

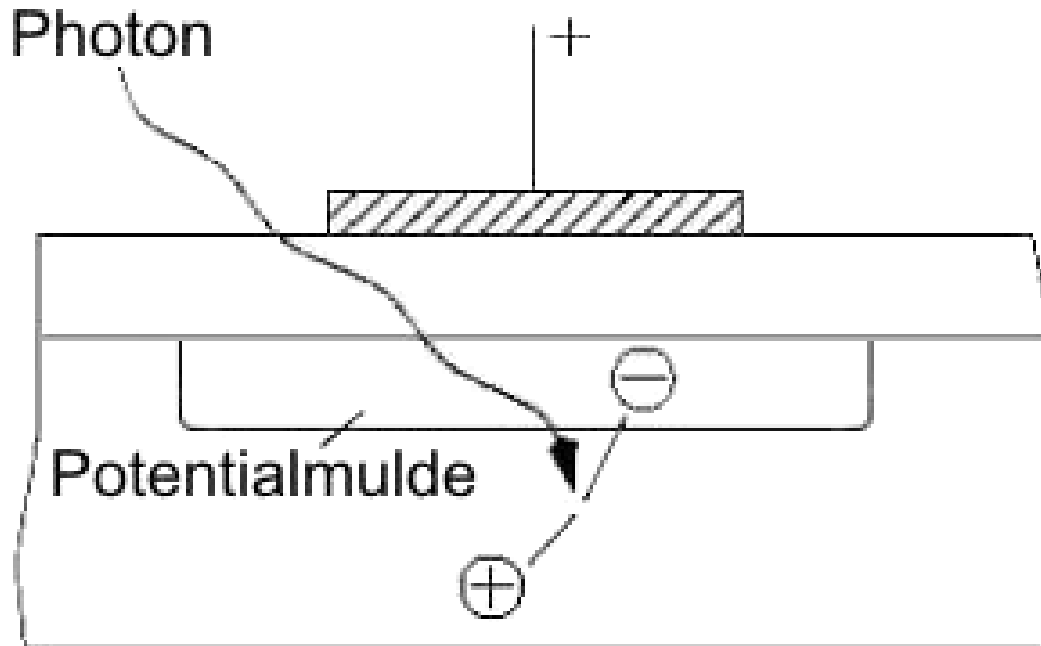
Bei der Belichtung des Chips wird an den Gates eine positive Spannung angelegt. Somit erhält das Gate (polykristallines Silizium) eine positive und das p-dotierte Silizium eine negative Ladung. In der Nähe der Grenzschicht zwischen

Substrat und Siliziumdioxid entsteht daraufhin in den Pixeln eine Zone, die an freien Ladungsträgern verarmt ist; diese wird als Potentialmulde bezeichnet (Abbildung unten).



Durch Anlegen einer positiven Spannung am Gate entsteht eine ladungsträgerfreie Zone, eine s.g. Potentialmulde.

Für die einfallenden Photonen sind die beiden oberen Schichten aus polykristallinem Silizium und Siliziumdioxid durchlässig. Im Kristallgitter des p-dotierten Silizium brechen die Photonen die kovalente Bindung auf und erzeugen ein Elektron-Loch-Paar. Die so während der Belichtungszeit freigesetzten Elektronen werden in den Potentialmulden der Pixel gesammelt und die Defektelektronen in das Siliziumsubstrat abgedrängt (Abbildung auf der nächsten Seite). Jedes einzelne Pixel wirkt daher wie ein kleiner Kondensator und speichert ein Ladungspaket aus Elektronen.



Auftreffende Photonen lösen Elektronen aus dem Substrat heraus; es bildet sich ein Elektronen-Loch-Paar – das freie Elektron wandert in die Potentialmulde.

Dabei ist die Anzahl der freigesetzten Elektronen proportional zur Zahl der einfallenden Photonen. Diese lineare Empfindlichkeit der Pixel ist ein entscheidender Vorteil der CCD-Technik gegenüber der herkömmlichen Fotografie. Aus diesem Grund wird die CCD-Kamera oft auch als linearer Photonendetektor bezeichnet. Je nach Wellenlänge der einfallenden Strahlung und dem damit eingebrachten Energiebetrag besitzt die CCD jedoch eine unterschiedlich hohe Empfindlichkeit.

Ein „Auslaufen“ der gespeicherten Elektronen wird in vertikaler Richtung (in benachbarte Pixelreihen) durch das zwischen den aufeinander folgenden Elektroden befindliche gestaffelte elektrostatische Feld verhindert. In horizontaler Richtung wirken zwischen den einzelnen Pixelreihen eingefügte Trennkanäle (Channel Stops), bestehend aus stark positiv dotiertem Silizium (z.B. mit implantierten Boratomen), dem entgegen (siehe Abbildung nächste Seite). Dieses reagiert kaum auf Potentialänderungen und trennt somit die Ladungen in den Pixeln voneinander. Von entscheidendem Vorteil ist, dass in den Trennkanälen, die genauso aus transparentem Material bestehen, ebenfalls Elektronen durch einfallende Photonen freigesetzt werden, welche sich dann durch das Material zur nächstgelegenen Potentialmulde bewegen. Damit entstehen keine Spalten zwischen den Pixeln, die unempfindlich gegenüber Licht

Zellen einen Dunkelstrom auf. Dieser Ausfall wird mit Hilfe von lichtdicht abgedeckten Pixel korrigiert (Optical Black).

Dunkelladung

In den einzelnen Pixeln der CCD werden nicht nur durch auftreffende Photonen bei Lichteinfall freie Elektronen erzeugt. Die Eigenbewegung der Elektronen reicht dazu ebenfalls aus. Diese ist von der Materialtemperatur abhängig. Die einzelnen so erzeugten freien Elektronen nennt man Dunkelladungen.

Die Anzahl der entstehenden Dunkelladungen ist dabei proportional zur Aufnahmezeit und wird mit sinkender Temperatur des Chips logarithmisch kleiner. Eine Kühlung des CCD-Chips reduziert die Menge der auftretenden Dunkelladungen, wobei eine Temperaturabsenkung um 5 bis 7 K jeweils eine Halbierung bewirkt. Hierdurch wird die thermische Bewegung der Elektronen im Halbleiter herabgesenkt. Eine Kühlung des CCD-Chips für astronomische Zwecke ist aufgrund der langen Belichtungszeiten essentiell. Die entstehenden Dunkelladungen verhindern eine unbegrenzt lange Belichtungszeit zudem von vornherein, da sie selbst die Pixel allmählich sättigen. Je geringer die Dunkelladungsrate ist, desto länger fällt die maximal mögliche Belichtungszeit aus.

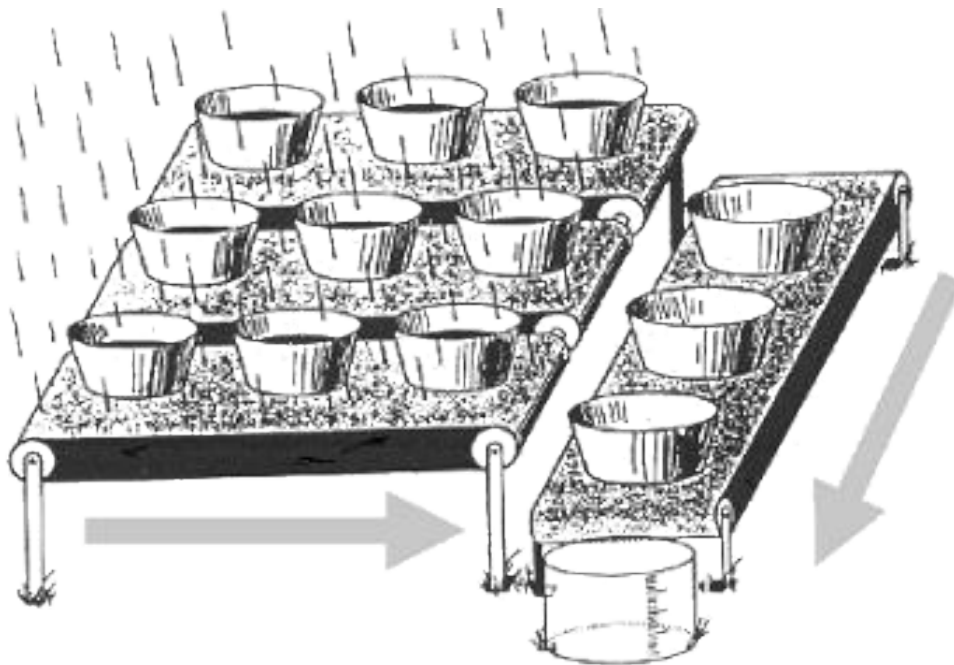
Das Dunkelladungsverhalten eines CCD-Chips wird als Dunkelladungsrate (Dark Count Rate) bzw. als Dunkelstrom (Dark Current) angegeben. Diese Zahl gibt an, wie viele Elektronen pro Pixel und Zeiteinheit bei einer bestimmten Chip-Temperatur freigesetzt werden. Die Dunkelladungsrate ist je nach Chip verschieden. Sie ist im allgemeinen umso höher, je größer die einzelnen Pixel sind.

Das vorhandene Signal des einfallenden Lichts wird durch die Dunkelladungen verfälscht. Um diesen Einfluss aus den aufgenommenen Bildern weitgehend zu entfernen, werden diese mit einer Korrekturaufnahme, einem so genannten Dark-Frame (Dunkelbild), bearbeitet.

Auslesevorgang und Digitalisierung

Ist die Belichtung beendet, erfolgt das Auslesen der Ladungspakete. Die gespeicherten Elektronen werden dazu mittels Potentialänderungen an benachbarten Elektroden von einem zum nächsten Pixel verschoben. Jede Elektrode des Chips ist einzeln ansteuerbar. Der Auslesevorgang ist mit dem Arbeitsprinzip eines Schieberegisters vergleichbar; modellhaft könnte man sich das Prinzip des Auslesevorgangs wie in Abbildung, nächste Seite, vorstellen. Die gespeicherten Ladungen werden pixelweise zum Rand des CCD-Chips in das serielle Register verschoben und nach einer Signalverstärkung vom Analog-Digital-Konverter (ADC) in elektrische Signale umgewandelt, die vom Computer verarbeitet werden können. Sobald eine komplette Zeile umgewandelt worden ist, werden die Ladungen wieder um ein Bildelement weiter geschoben, so dass

eine weitere Zeile ins serielle Register gelangt und ausgelesen werden kann.



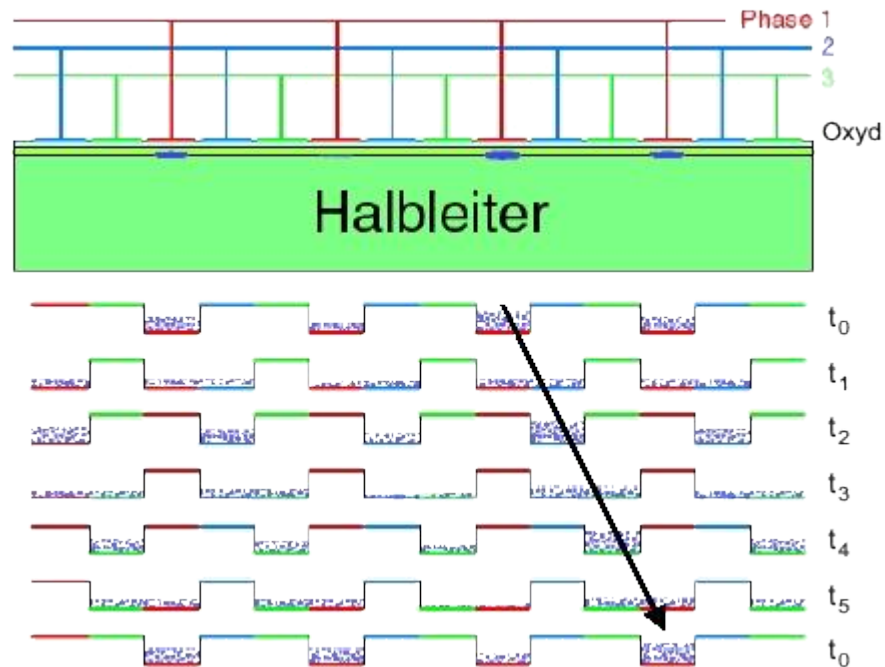
Modellhafte Beschreibung des Auslesevorgangs einer CCD-Kamera – durch pixelweises Verschieben der Ladungen ins serielle Register wird Zeile für Zeile des Chips ausgelesen.

Physikalisch wird der Ladungstransport in Form eines Zwei-, Drei-, oder Vier-Phasen-Transfers realisiert; wobei sich jeweils ebenso viele Elektroden auf jedem Pixel befinden. Für das Entstehen einer Potentialmulde wird zwar nur eine Elektrode benötigt - für die Ladungsverschiebung müssen allerdings mehrere Elektroden auf dem Pixel angebracht sein. Das Prinzip bleibt das gleiche – die Notwendigkeit von mehreren Elektroden für das Verschieben der Ladungen soll im folgenden am Drei-Phasen-Transfer erklärt werden:

Auf jedem Pixel sind drei Elektroden angebracht; diese werden getrennt über Taktimpulse eines Oszillators gesteuert. Solange Licht auf die Pixel fällt, werden die dadurch freigesetzten Elektronen in der Potentialmulde gesammelt. Dazu darf während der Belichtung nur an der mittleren der drei Elektroden jedes Pixels eine positive Spannung anliegen – sonst wäre keine Trennung der Ladungspakete möglich. Legt man nun nacheinander an benachbarten Elektroden eine positive Spannung an, folgen die Elektronen dieser nach.

Am besten verdeutlicht man sich den Drei-Phasen-Transfer an Abbildung nächste Seite. Zunächst wird an einer benachbarten der mittleren Elektrode eine positive Spannung angelegt – die Potentialmulde wird größer, die Elektronen

verteilen sich darin. Dann wird die Spannung an der mittleren Elektrode abgeschaltet – die Elektronen sammeln sich nun unter der benachbarten Elektrode, an der noch eine positive Spannung anliegt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle Ladungen der einzelnen Pixel das serielle Register am Rand des CCD-Chips erreicht haben.



Schema des Drei-Phasen-Transfers.

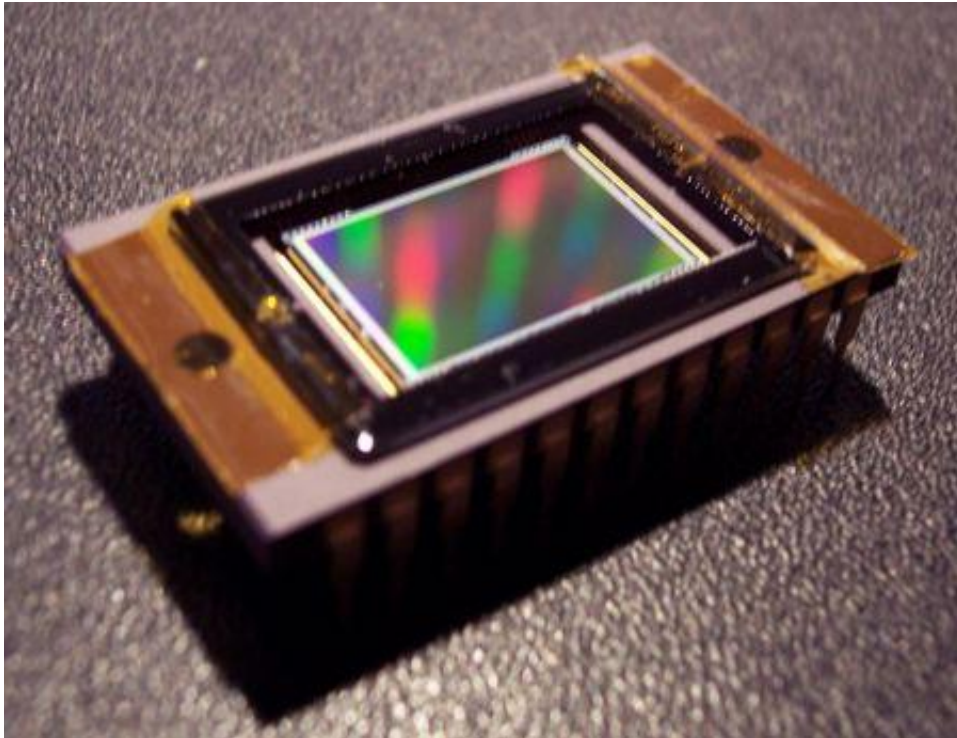
Nach erfolgtem Auslesen der gesamten CCD-Matrix ist jedem Pixel ein Zahlenwert zugeordnet, der im Computer mit der geometrischen Position des Pixels verknüpft in einer Bilddatei abgespeichert wird. Dieser Zahlenwert kennzeichnet die Menge des Lichts, welche auf das Pixel eingefallen ist. Je nach Auflösungsbereich des A-D-Wandlers sind hier verschieden viele quantitative Abstufungen bzw. Graustufen möglich. Der Wert 0 (= weiß) entspricht dabei keiner vorhandenen Ladung, der größtmögliche Wert (= schwarz) der maximal möglichen Ladung eines Pixels. Ein 16bit AD-Wandler unterscheidet beispielsweise $2^{16} = 65536$ Graustufen. So erhält man ein negatives Bild, welches invertiert wird, um optisch zu einem positiven Bild zu gelangen. Der Auflösungsbereich des menschlichen Auges ist jedoch bei weitem geringer als der eines AD-Wandlers. 256 Graustufen sind bei einem Standardmonitor mit normaler Leuchtkraft bei Umgebungslicht völlig ausreichend. Das Bild wird deshalb für die optische Betrachtung auf einen niedrigeren Dynamikbereich umgerechnet und entsprechend skaliert.

Zur Steigerung der Empfindlichkeit des CCD-Chips können mehrere Pixel zu

größeren Bildelementen zusammengefasst werden. Dieses Zusammenfassen von Pixeln wird als Pixel-Binning bezeichnet. Das Bild verliert damit jedoch an Auflösung.

CCD-Chip

Der CCD-Chip wird in einem mit Fenster versehenen Bildwandlergehäuse untergebracht. Ein CCD-Bildwandler mit einer Bilddiagonale von 11 mm wird als ein 2/3"-CCD-Bildwandler bezeichnet. Es werden Bildwandlergrößen von 2/3" bis 1/4" gefertigt. Für die professionellen Kameras werden meist die 2/3"-CCD-Bildwandler verwendet. Die Pixelanzahl für ein fernsehtaugliches Bild wird auf einer ca. 0,5 cm² großen CCD-Bildwandlerfläche umgesetzt. Dementsprechend hoch ist der Anspruch an die Fertigungsindustrie. Man unterscheidet zwischen drei verschiedene CCD-Typen für den Videobereich. Es gibt den FT (Frame Transfer) -, IT (Interline Transfer) - und FIT (Frame-Interline-Transfer) -Typ.



Kodak KAF-3200ME CCD-Sensor;
Full-Frame-CCD, 2184 x 1510 Pixel, Pixelgröße 6.8µm;
u.a. verwendet in SBIG ST-10XME
(Foto: Karsten Schindler)

Spektrum der CCD Installationen

CCDs selbst sind eigentlich nicht für eine bestimmte Farbe empfindlich. Um sie für eine Farbe empfindlich zu machen, müssen Filter zwischen das Objektiv und den CCD Chip eingebaut werden. Je nachdem, um welche Art von Kamera es sich handelt, wird die 3-Chip-Kameras oder auf Pixel-Basis (bei Ein-Chip Kameras) vorgenommen. Die technisch sauberste Lösung arbeitet mit drei Chips. Das Bild wird hinter der Optik durch ein Prisma in drei identische Bilder gesplittet und verteilt sie durch drei Filter der Primärfarben auf drei CCD Sensoren. Die CCDs sind mechanisch bereits so montiert, dass die Pixel im richtigen Raster zueinander stehen, wie sie auch für die Wiedergabe benötigt werden. (superimposed) So liefert jeder CCD Chip ein vollständiges R, G oder B-Bild. Eine Elektronik kann so abgeglichen werden, dass sie die verschiedenen Farbauszüge in Helligkeit und Schwarzwert in einem natürlichen Verhältnis zueinander stehen. Die preiswertere Lösung, die ein Chip Kamera ist deutlich aufwändiger und fehlerbehafteter. Ein einzelner CCD Chip muss hier die Aufteilung in drei Auszüge allein vollführen. Hier werden die Helligkeits- und Farbwerte durch Interpolation ermittelt. Tatsächlich werden je vier Pixel zum Ermitteln der Farbauszüge erfasst. Dafür werden jeweils mehrere Zeilen verwendet um eine Bildzeile darzustellen. (Ein-Chip Kameras haben in der Werbung daher oft fast die doppelten Pixelzahlen als Drei-Chip Kameras gleicher Bildauflösung) Aus der Gesamthelligkeit (Y) sowie dem Wert R-Y und B-Y errechnet die Kamera die fehlenden dritten Farbauszüge des G-Bereichs:

$$\begin{aligned}L \text{ (Helligkeit) ist } & R+G+B \\ B \text{ ist } & (R+G+B) - (R+B) - (G-B) \\ G \text{ ist } & (R+G+B) - (R+B) \\ R \text{ ist } & L-B-G\end{aligned}$$

Von den vier verwendeten Pixeln werden meistens zwei für Grün, und je eines für Blau und Rot verwendet. Das liegt daran, dass der Mensch für Grün besonders empfindlich und dessen akkurate Wiedergabe deshalb besonders wichtig ist. Es gibt auch CCD Konstruktionen die mit subtraktiven Filtern arbeiten. Diese verwenden die vier Pixel als CMY+G. Auch hier wird ein zusätzliches Pixel für die Grün-Information reserviert. Diese Filtermethode schluckt weniger Licht und gilt daher als fortschrittlicher und lichtempfindlicher.

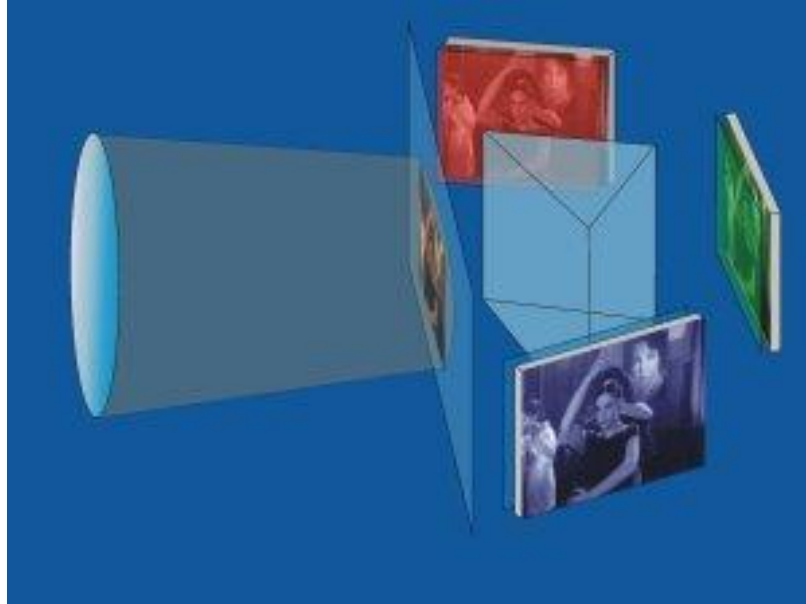


Bild: Prinzip der 3CCD-Chip-Technik

Anwendung der CCDs

Grundsätzlich stößt die Ein-Chip Technik auf Grenzen, wenn die Details, die man aufnimmt kleiner sind als die Pixel. Sobald ein Detail nämlich nur einen Teil der Vier-Pixel Raster beleuchtet, kommt es zu Artefakten wie Moiré Effekten. In Digitalen Fotoapparaten kommen meist Ein-Chip Systeme zum Einsatz, da diese Fotoapparate meistens sehr kompakt aufgebaut sein sollen. Schließlich müssen sie mit stark miniaturisierten Fotoapparaten mithalten.

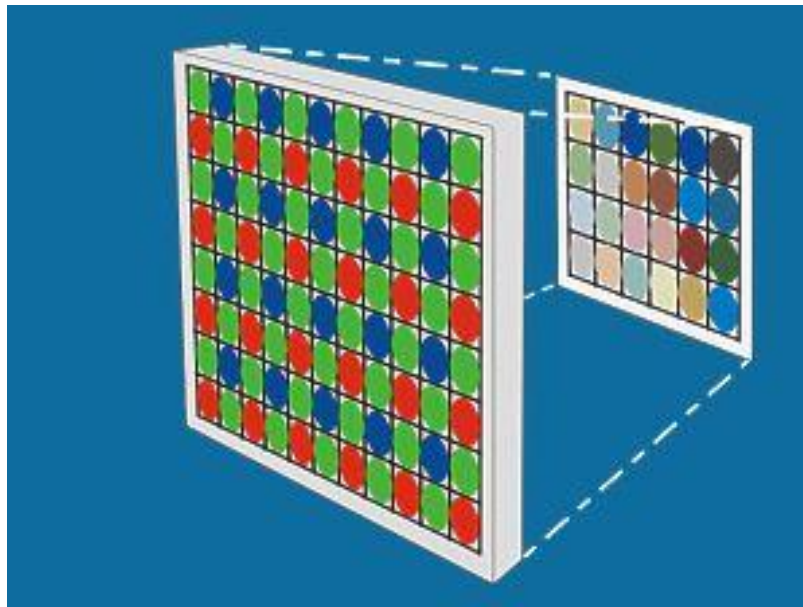


Bild: Prinzip der Einchip-Kamera

Licht und Spannung

CCDs sind Aneinanderreihungen von Photodioden und haben zwei wichtige Aufgaben: Sie übersetzen Helligkeitswerte in ein elektrisches Signal und sie müssen ein konkretes Bildfeld als eine Folge von Pixeln auslesen. (Zeilen, Halbbilder etc.) Die Helligkeit wird in einem entsprechenden Verhältnis in Spannung umgesetzt. Doppeltes Licht bedeutet auch doppelte Spannung am Pixel. Das ist ein linearer Vorgang. Leider bewegt sich die Aufnahmefähigkeit der Chips zwischen der minimalen und maximalen Helligkeitswiedergabe ganz linear. Möchte man sich bei der Bildwiedergabe aber der menschlichen Wahrnehmung nähern, die geht nämlich logarythmisch mit Helligkeitswerten um, so geschieht diese durch nachträgliche, elektronische Schaltkreise. Gammaeinstellung, black stretch, soft knee oder full DSP control der Tonwerte.

Wenig Licht

Im Prinzip ist die Empfindlichkeit der Chip extrem hoch. Bereits geringstes Licht, also einzelne Photonen können als Licht wahrgenommen werden und ein Bild erzeugen. In Wirklichkeit gibt es aber in den Halbleitern auch unerwünschte freie Elektronen, die ein Grundrauschen dem Bildsignal hinzufügen. Das ist die untere Grenze der Empfindlichkeit. Das Grundrauschen ist übrigens auch abhängig von der Arbeitstemperatur. In einer kalten Umgebung ist es niedriger, in Wärme (Sommer etc.) ist es höher. Das Grundrauschen verdoppelt sich etwa alle 10 Grad.

Modernere Sensoren und ein ganzes accumulation layer reduzieren das Grundrauschen um den Faktor 10. Frühe CCDs arbeiteten sogar mit einer eigenen Kühlung um das Grundrauschen niedriger zu halten.

Größe der Chips: Größere Chips müssen das Signal nicht so sehr verstärken, sie haben einen besseren Signal-Rauschabstand. Kleine Chips arbeiten mit kleineren empfindlichen Flächen und liefern weniger Spannung. Diese muss also bei wenig Licht höher verstärkt werden, was das Rauschen erhöht.

Viel Licht

Maximale Helligkeit. Diese ist von der Fähigkeit des Sensors abhängig, Ladung zu halten. Wenn zuviel Licht auf den Sensor trifft, so läuft er quasi über, das Bild brennt in ein flächiges Weiß aus. Wenn diese Überladung zu groß ist, so kann davon der gesamte Informationstransport im Chip betroffen sein und es kommt zu vertikalem Smear Effekt. Man kann diesen Fehler reduzieren durch besonderes Chip-Design und Entladungswege.

Sensibilitäts- und Helligkeitsunterschiede

Nicht alle Pixel der CCD besitzen genau die gleiche Empfindlichkeit gegenüber den auftreffenden Photonen. Dies ist herstellungsbedingt und z.B. dadurch begründet, dass der Chip niemals vollkommen homogen dotiert werden kann und

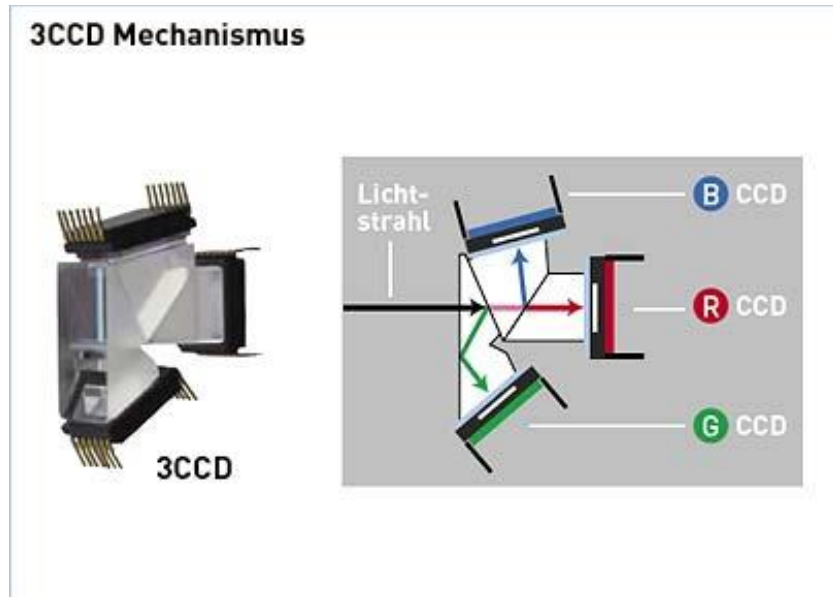
geringe Fertigungstoleranzen auf molekularer Ebene aufweist. Dadurch sind Abweichungen von 5% in der Ladungsmenge zwischen allen Pixeln des CCD-Chips möglich, obwohl jedes Pixel die gleiche Anzahl von Photonen erhält. Zwei benachbarte Pixel unterscheiden sich in ihrer Empfindlichkeit maximal um 1%. Des Weiteren wird durch optische Einflüsse nicht immer eine gleichmäßige Belichtung bzw. Ausleuchtung des ganzen Chips erzielt.

Besonderheit von CCDs

Die zweite Aufgabe der Chips: Eine Reihe, einen Ablauf bilden. Wenn so ein Chip mit einem Bild aufgeladen ist, muss es in ein serielles Video-Signal verwandelt werden. Nun haben wir schon lange keine Nipkow-Scheiben mehr in den Videokameras, also muss das irgendwie anders geschehen. Nun die CCDs verdanken ihren Namen dem Verfahren mit dem sie das bewerkstelligen: Charge-coupled devices. CCDs arbeiten mit der Weitergabe von Ladungen. Das bedeutet jedes Einzelelement kann seine Ladung nicht nur speichern, sondern sie auch an das Nachbarelement weitergeben. Sie folgen alle einem bestimmten Raster. Am Ende einer solchen Pixelreihe wird die Ladung in einen Speicher verschoben. So wird eine Ladung nach der anderen durch die Elemente verschoben.

3-CCD-Chip-Verfahren

Beim 3 – CCD Verfahren wird das vom Objekt ausgesandte Licht auf **drei unabhängige CCD Sensoren** gelenkt, **die jeweils einen R, G oder B-Farbfiler haben**. Der Vorteil dieser Methode ist, dass im Gegensatz zu der anschließend vorgestellten 1 – Chip Technik keine Interpolationsalgorithmen angewandt werden müssen und somit auch keine Schärfeverluste und Moireeffekte entstehen. Allerdings hat das 3 – CCD Verfahren auch einen großen Nachteil: durch die beiden zusätzlichen CCDs und die komplizierte Optik (bei einer Pixelgröße von ca. $5 \times 5 \mu\text{m}$ müssen die Lichtstrahlen bei jedem der 3 CCDs auf den gleichen Pixel fallen) ist der Preis ungleich höher als bei einer vergleichbaren 1 CCD Kamera. Die 3 – CCD Technologie findet daher fast ausschließlich bei Profikameras Verwendung. Wenn eine Kamera nur dazu dienen soll, starre Objekte aufzunehmen (z.B. Produktbilder für Kataloge), dann genügt auch ein einziger CCD Sensor, mit dem man einfach drei mal hintereinander mit jeweils einem anderen RGB Farbfiler ein Foto macht. Voraussetzung ist dabei natürlich ein professionelles Stativ, da kleinste Veränderungen an Kamera bzw. Objektposition zu unbrauchbaren Ergebnissen führen.



HDTV-CCD

Die Bildwandlerdiagonale des HDTV-CCD-Chip ist nicht größer als bei dem Standard-TV-CCD-Chip. Auf einem 2/3"-Wandler mit einer Bildfläche von 9,6 mm x 5,4 mm müssen für den HDTV-Standard ca. 1920 x 1100 Pixel untergebracht werden. Das sind über 2 Millionen Sensorelemente in der Größe von 5µm. HDTV-CCD werden nach dem FT (Frame Transfer)- oder (M)- FIT ((Multiple)-Frame-Interline-Transfer)-Prinzip gebaut. Aufgrund der hohen Pixelzahl wird auch eine höhere Auslesetaktfrequenz von ca. 70 MHz benötigt.

Verschiedene Arten von CCD-Chips

CCD-Chips werden in unterschiedlichen Ausführungen gefertigt. Grundsätzlich kann man hier nach der Seite des Lichteinfalls und der Art des Auslesevorgangs in verschiedene Typen unterteilen. Jede Bauweise bringt natürlich wieder gewisse Vor- und Nachteile mit sich.

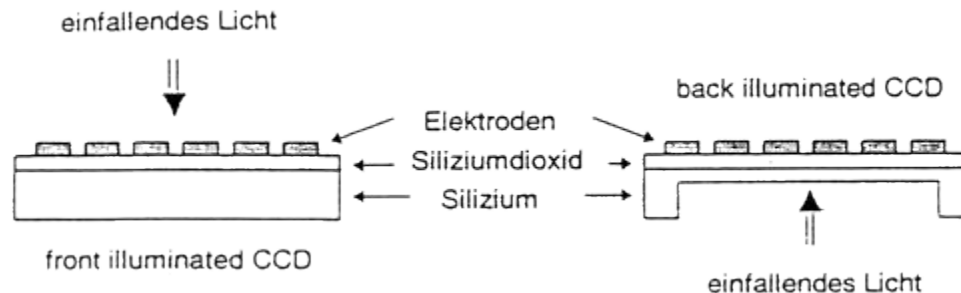
FI-Chips

Bei „**Frontside-Illuminated-CCDs**“ fällt das Licht von vorn auf den Chip. Die auftreffenden Photonen durchdringen zuerst Elektrode und Siliziumdioxidschicht und erzeugen dann, wie bereits beschrieben, im Siliziumsubstrat freie Ladungen. Die Quanteneffizienz beträgt hierbei maximal 50 %. Eine große Zahl von Photonen wird vor Erreichen des Substrats in Elektrode und Siliziumdioxidschicht absorbiert. Die zu überwindende Energiedifferenz des Siliziums beträgt $\Delta E = 1,12 \text{ eV}$. Hierdurch wird gleichzeitig die spektrale Empfindlichkeit des Chips

eingeschränkt: Elektromagnetische Strahlung ab ca. 1100 nm Wellenlänge besitzt nicht mehr genügend Energie, um freie Elektronen zu erzeugen. Andererseits kann Strahlung mit einer Wellenlänge kürzer als 400 nm nicht mehr tief genug in das Material eindringen, um Elektronen herauszulösen.

BI-Chips

Bei „**Backside-Illuminated-CCDs**“ treffen die Photonen wie bereits am Namen erkennbar von hinten direkt auf das Siliziumsubstrat. Dadurch gehen weniger Photonen verloren, da keine Absorption auftritt. Da das Silizium milchig-trüb gefärbt ist, können die Photonen nur begrenzt tief ins Material eindringen. Vorteil dieser Bauweise ist, dass eine höhere Anzahl von Elektronen gegenüber Frontside-Illuminated-CCDs freigesetzt wird. Um diese auch in den Potentialmulden sammeln zu können, muss die kovalente Bindung möglichst nahe des Gates aufgelöst, sprich das Elektron in möglichst geringer Entfernung zu den Elektroden freigesetzt werden. Das Siliziumsubstrat muss daher sehr dünn sein (ca. 10 μm). Die spektrale Empfindlichkeit reicht von 300 nm bis 1000 nm und ist daher größer als bei Frontside-CCDs. Die Quanteneffizienz kann bis zu 85% betragen. Nachteilig sind jedoch die hohen Herstellungskosten, da aufgrund des dünneren Substrates feinere Strukturen gefertigt werden müssen.



Schema einer Front- und Backside-Illuminated CCD.

Zudem ist eine Unterteilung in „Interline-Transfer-CCDs“, „Frame-Transfer-CCDs“ und „Full-Frame-CCDs“ möglich.

FT-Chips

FT-Chips (Frame Transfer) arbeiten anders. **Frame-Transfer-CCDs** (Abbildung nächste Seite) bieten hingegen bei ungeteilter lichtempfindlicher Chipfläche die Möglichkeit, mehrere Bilder in kurzen Abständen hintereinander aufzunehmen. Hierzu wird aber die doppelte Chipgröße benötigt, die effektiv zur Bildaufnahme zur Verfügung steht. Die Chipfläche wird dabei in zwei identische Zonen geteilt.

Nachdem die erste Teilfläche des Chips, die Bildzone, belichtet wurde, werden alle Ladungspakete gleichzeitig vertikal verschoben, bis sich das gesamte Bild in der zweiten Teilfläche des Chips, der Speicherzone befindet. Die Speicherzone ist durch eine Maske vor Lichteinfall geschützt. Die Ladungen werden dann, wie bereits das Funktionsprinzip und die Eigenschaft des CCD-Chips vorher beschrieben, über ein an die Speicherzone angrenzendes serielles Register ausgelesen. Nachteilig ist, dass während des Verschiebens der Ladungen weiterhin Licht auf den Chip einfällt. Ladungspakete, die bereits die Speicherzone erreicht haben, sind vor Veränderungen durch Lichteinfall geschützt. In der Bildzone werden während des Verschiebens allerdings weiterhin Elektronen freigesetzt und kommen zu den Ladungspaketen hinzu. Da der Verschiebevorgang einige hundert μs dauert, kann bei kurzen Belichtungszeiten ein Verschmieren des Bildes auftreten. Hier sollte die Aufnahmezeit im Verhältnis zur Zeit des Verschiebeprozesses möglichst groß sein. In der Astronomie wird aufgrund der üblichen langen Belichtungszeiten die Qualität des Bildes kaum beeinträchtigt.

Sie haben unterhalb jedes Elements einen Speicherbereich. Jede Photodiode legt einzeln ihr Bildinformation im Speicher ab wo sie dann seriell ausgelesen wird. Um zu verhindern, dass ständig Ladung abgegeben wird, verwenden diese Kameras einen Shutter der den Lichteinfall während des Auslesens der Information verhindert. Auf diese Weise sind Kameras mit FT Chips relativ resistent gegen Smear-Effekte. Der größere Speicheraufwand und der Shutter machen die FT-Chips relativ teuer.

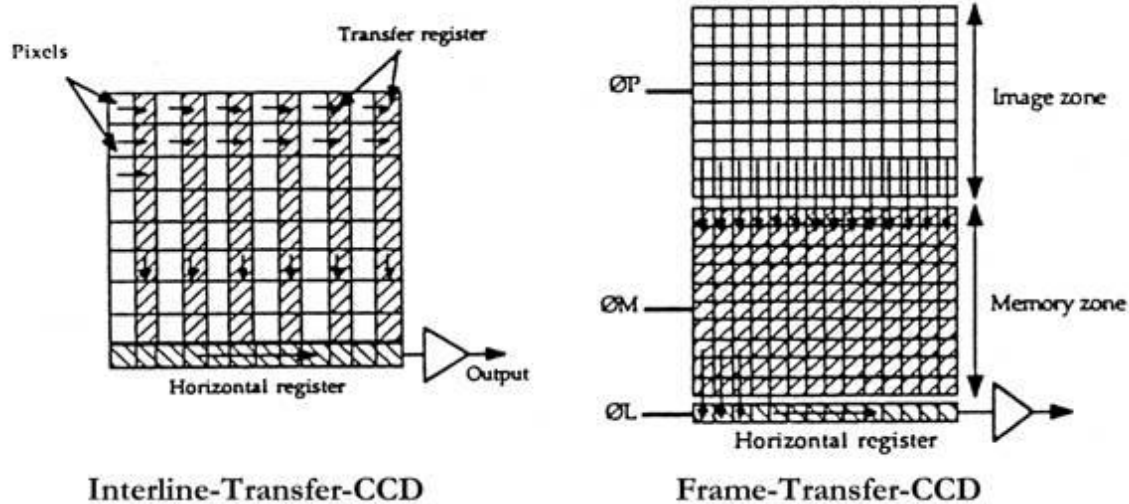
Mit dem Shutter lässt sich die Belichtungszeit von 1/50S. auf 1/1000S. etc verringern.

IT-Chips

IT-Chips (Interline Transfer) sind heute die gängigsten Chips. Statt eines kompletten Speicherbereichs für jede Photodiode haben sie lediglich senkrechte Transport-Register die die Informationen weitertransportieren. Durch geschickte Maskierung, jede zweite vertikale Pixelreihe wird durch eine Aluminium-Maske abgedeckt (Abbildung nächste Seite), ist ein Shutter überflüssig. Dadurch wird jedoch die lichtempfindliche Fläche des Chips halbiert. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass zwischen der Aufnahme mehrerer Bilder keine Wartezeit mehr entsteht. Nach der Belichtung werden die in den unverdeckten, lichtempfindlichen Pixeln gesammelten Ladungen alle gleichzeitig in ihr benachbartes, abgedecktes Pixel verschoben. Während die Ladungen aus den abgedeckten Reihen nacheinander ins serielle Register gelangen, kann in der Zeit des Auslesevorgangs in den lichtempfindlichen Pixeln schon das nächste Bild aufgenommen werden. Somit können Aufnahmen direkt aufeinander folgen.

Der Nachteil, der relativ langsame Transport der Ladungen erlaubt jedoch das Entstehen von Smear. Außerdem reduziert der Platz für diese Transportwege die lichtempfindliche Fläche. Deshalb sind IT Chips weniger lichtempfindlich als FT

Chips. Um das auszugleichen, werden häufig winzige Linsen (microlenses) auf der Oberfläche der Chips aufgebracht, die das Licht bündeln.



Schema einer Interline- und Frame-Transfer-CCD.

FIT-Chips

FIT-Chips verknüpfen die guten Eigenschaften der vorgenannten Verfahren. (Frame-Interline Transfer) Chips arbeiten mit vertikalen Transportwegen, die aber alle einzelne Speicher haben um die Ladungen schnellstmöglich abzugeben. Damit ist Smear reduziert und es wird durch die Maskierung kein Shutter benötigt. Sie sind recht kostspielig und werden in höherwertigen Profikameras verwendet.

CCDs liefern analoge Informationen, nicht digitale. Es werden Ladungen weitergegeben.

FF-Chips

Bei **Full-Frame-CCDs** hingegen ist die gesamte Chipfläche lichtempfindlich. Eine schnelle Aufnahme von Bildfolgen ist in der Astronomie meist nicht erforderlich, die Größe des Bildfeldes hingegen ist jedoch von entscheidender Bedeutung. Gegenüber Frame-Transfer-CCDs verdoppelt sich daher die nutzbare Aufnahme­fläche. Deshalb kommen Full-Frame-CCDs in der Regel in CCD-Kameras für astronomische Anwendungen zum Einsatz. Während des Auslesevorgangs muss der CCD-Chip mit Hilfe eines mechanischen Verschlusses vor Lichteinfall geschützt werden, da es sonst zu einem

Verschmieren des Bildes aufgrund unterschiedlicher Belichtungszeiten der Pixel kommt. Alle Ladungspakete werden der Reihe nach über ein am Rand der Chipfläche angebrachtes serielles Register ausgelesen.

Pixel- und Spaltendefekte

Unter Defektpixeln versteht man einzelne abnorme Pixel, deren Ladungsmengen nicht linear von der Belichtungszeit abhängig sind. Deren Auftreten ist unvermeidbar und durch den Herstellungs- und Alterungsprozess der CCD begründet. Mit zunehmendem Alter nimmt in der Regel auch die Anzahl der Defektpixel zu. Die erhältlichen CCD-Chips werden, je nach Anzahl und Konzentration der Defektpixel, preislich nach Güteklassen gestaffelt. Hierbei unterscheidet man zwei Arten von abnormen Pixeln: Zum einen gibt es Pixel, die im Bild immer als helle Punkte erscheinen. Sie besitzen eine viel größere Dunkelladungsrate als ihre Nachbarpixel und werden deshalb als „hot pixel“ bezeichnet. Zum anderen enthält die CCD Pixel, die als schwarze Punkte erkennbar sind. Diese sind gegenüber der einfallenden Strahlung weitgehend oder völlig unempfindlich und werden aus diesem Grund als „cool pixel“ bezeichnet. Neben einzelnen Pixeldefekten können auch ganze oder Teile von Spalten dementsprechend reagieren.

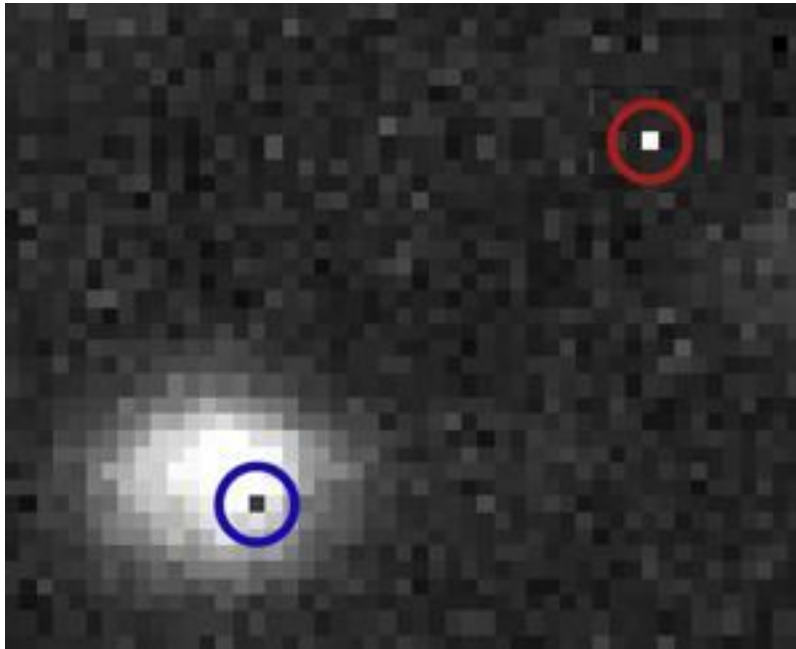


Bild: Jeweils ein eindeutig erkennbares hot (rot) und cool pixel (blau markiert), welches in seinem Grauwert deutlich von der Umgebung abweicht. (stark vergrößerter Ausschnitt, 60s, High Resolution)

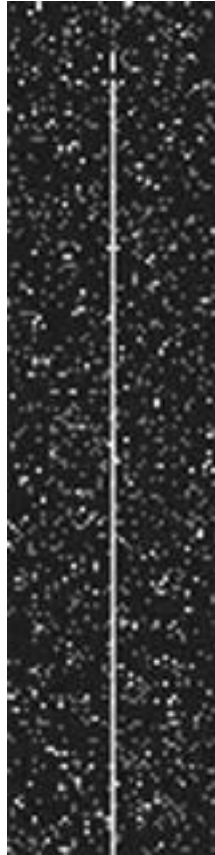


Bild: Spaltendefekt eines CCD-Sensors. Ein defektes Pixel setzt abnormal viele Dunkelladungen frei, die beim Auslesevorgang zu nachrückenden Ladungspakete hinzukommen und damit den hinter dem Pixel liegenden Teil der Spalte unbrauchbar machen.

Blooming

Dieser Bildfehler entsteht bei der Aufnahme sehr heller Objekte oder einer zu lang gewählten Belichtungszeit. Er ist nicht korrigierbar und kann bestenfalls provisorisch mit Hilfe eines Grafikprogrammes retuschiert werden. Die Aufnahme muss, sofern das beobachtungsrelevante Objekt betroffen ist, verworfen und erneut mit einer verkürzten Belichtungszeit durchgeführt werden.

Jedes Pixel kann eine bestimmte Anzahl von Elektronen in der Potentialmulde speichern. Wird in einem Pixel durch eine zu hohe Anzahl auftreffender Photonen eine zu große Menge von Elektronen freigesetzt, die die Speicherkapazität (Full Well Capacity) des Pixels übersteigt, können die Elektronen nicht mehr in der Potentialmulde gehalten werden - das Pixel ist gesättigt. Die überschüssigen Elektronen laufen nun in die nächsten Pixel der Spalte des CCD-Chips über. In der Aufnahme erkennt man am Objekt vertikale

Streifen; es entsteht förmlich der Eindruck, das Objekt läuft in vertikaler Richtung auseinander (siehe Abbildung unten). Ein Ausweichen in horizontaler Richtung wird durch die Channel Stops verhindert.

Einige CCD-Chips sind mit dem Prädikat „Anti-Blooming“ (ABG) gekennzeichnet. Sie enthalten eine zusätzliche Struktur zur Vermeidung des Blooming-Effektes, so genannte Anti-Blooming-Gates. Diese sind zwischen den Pixeln angebracht und sollen ein Überlaufen der Elektronen auf benachbarte Pixel verhindern. Modellhaft kann man sich das wie eine Art Sperrgitter vorstellen. Dieses hat allerdings zwei entscheidende Nachteile: Zum einen verringert sich die Menge der maximal aufnehmbaren Elektronen pro Pixel (halbiert sich etwa), da die Pixelgröße und somit die Empfindlichkeit des CCD-Chips reduziert wird. Zum anderen ist die Empfindlichkeit nicht mehr linear, womit einer der Hauptvorteile von CCD-Chips wegfällt. Außerdem muss man bedenken, dass aufgrund der Trennung der Pixel durch ABG-Gates ein Teil des Chips lichtunempfindlich wird. Dadurch kann keine genaue Fotometrie mehr betrieben werden, da die Lichtmenge, die auf diese lichtunempfindlichen Flächen zwischen den Pixeln fiel, nicht bekannt ist. ABG-CCDs sind daher für astronomische Zwecke nicht von Interesse.

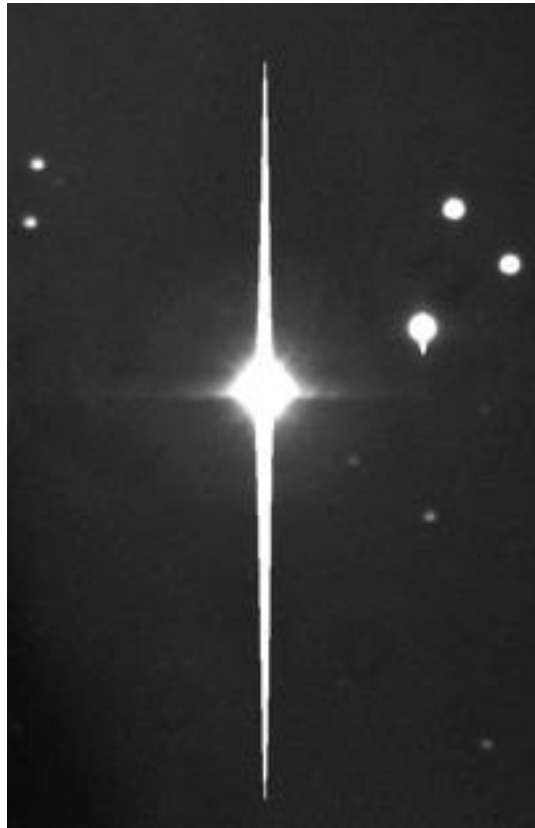


Bild: Blooming-Effekt; Ausschnitt einer Aufnahme der Plejaden.

CMOS-Chip-Technik

(Auszüge aus der Diplomarbeit von Jürgen Hauser/ 2002)

CMOS-Bildwandler

Die MOS- (Metall Oxid Semiconductor) Technologie gab es schon in den 60er Jahren und wurde zu CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor = bedeutet paarweise zueinander) weiterentwickelt. Die CMOS-Bildwandler haben einige Vorteile gegenüber des CCD-Wandlers. Bei der CMOS-Technologie ist jeder Bildpunkt mit einem eigenen Transistor versehen, der die Information über den Ladungszustand des einzelnen Pixels weitergibt. Es existiert also der Zugriff auf jeden einzelnen Bildpunkt. Somit entfällt bei CMOS- gegenüber des CCD-Chips der aufwändige und anfällige Ladungsverschiebemechanismus. Die Intergration von Bildwandler und Signalverarbeitungselektronik in einem CMOS-Chip ermöglicht eine Vielzahl von Bildmanipulationsmöglichkeiten, so z.B. das Auslesen eines Teilbereiches des Wandlers, die sogenannte Region of Interest (ROI) oder die nicht lineare Bewertung der Signalwerte, was zu einem höheren Dynamikumfang der Bilderfassung führt.

Bei der CMOS-Technik wird als Bildwandler eine PN-Fotodiode verwendet. Der Nachteil der CMOS- gegenüber der CCD-Wandler sind die größere Bildpunkte, deswegen wird im praktischen Einsatz die CCD-Technologie bevorzugt.

CMOS–Gegensätzliche verschaltete Transistoren

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.

Aufbau eines CMOS – Sensors

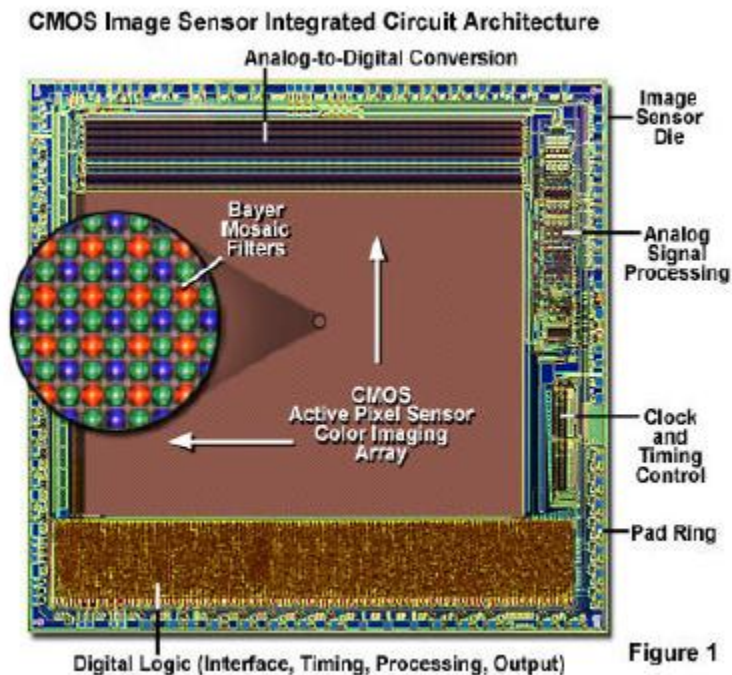


Abb. 4.1.

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, das an jeder Kreuzung eine Fotodiode mit Signalverarbeitungselektronik enthält. Der Bus leitet die Leseanfrage an die Fotodioden weiter und bringt die Ausleseinformation

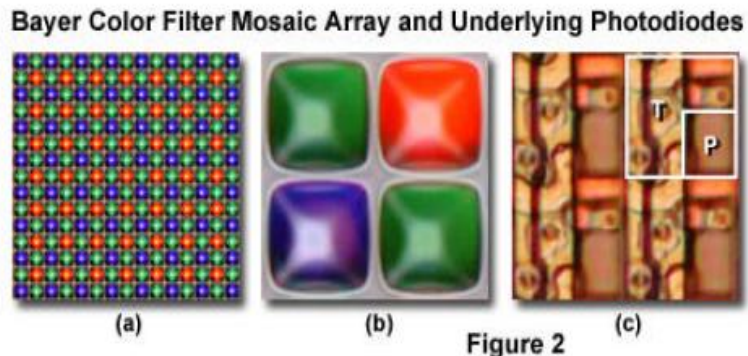
zurück zum Analogdekoder und –prozessor, der sich entfernt vom Aufnahme­feld auf dem Chip befinden kann. Diese Technik erlaubt es, jeden Pixel des Feldes direkt zu adressieren und auszulesen, was mit der CCD-Technologie von heute noch nicht möglich ist.

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.

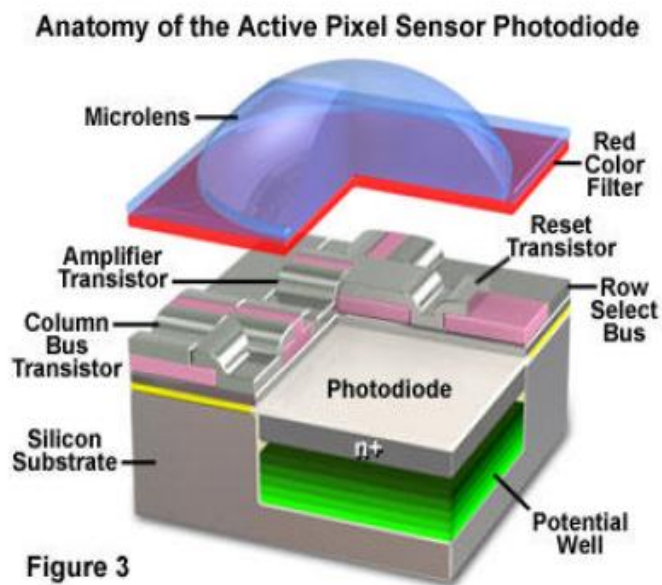
In Abb. 4.2.b erkennt man die kleinen Linsen (Kapitel 5.3.), die auf jeden Farbfilter aufgebracht wurden. Abb. 4.2.c zeigt vier komplette Pixeleinheiten. Man erkennt die zwei weißen Quadrate mit den Buchstaben **P** und **T**. Das P - Quadrat beschreibt den Bereich, in dem Licht gesammelt wird. Der T - 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 des geringen Verhältnisses der Fotodiode zur Gesamtpixelfläche, sagt man auch, die **Apertur**, oder der **Füllfaktor** beträgt 30%. In der Folge sinkt **Lichtempfindlichkeit**, was eine Verringerung des Signal-Rausch-Verhältnisses (*engl.*: **SNR**) zur Folge hat. Auch die Bilddynamik wird dadurch beeinträchtigt. Aperturwerte variieren für CMOS – Sensoren von Gerät zu Gerät von 30 bis 80%.

Man versucht, die Polysilizium- und Polyamidschichten an der Oberfläche der Fotodiode möglichst dünn zu gestalten, um die Lichtempfindlichkeit nicht zu sehr zu verringern. Kurze und mittlere Wellenlängen werden schon innerhalb der ersten Mikronen der fotoempfindlichen Schicht absorbiert, lange Wellenlängen durchdringen das Material stärker. Die längste sichtbare Wellenlänge (650 nm) durchdringt das Material oft vollständig, ohne erfasst zu werden. Obwohl Linsen die Lichtempfindlichkeit vervielfachen können, hängt ihre Wirksamkeit auch vom Eintreffwinkel der Photonen ab.

Abb. 4.3.

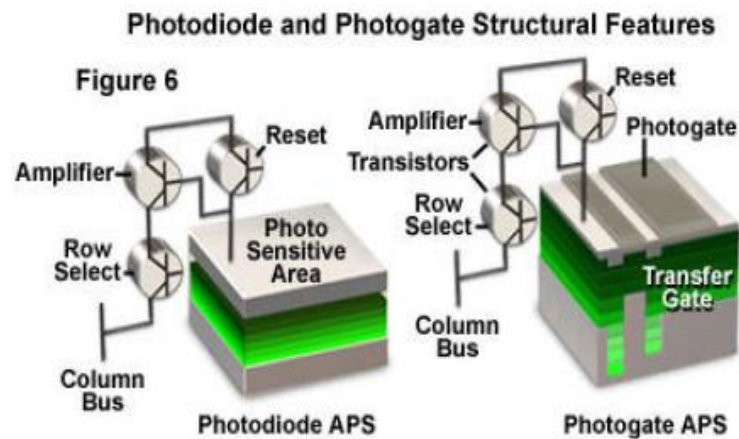


eine APS Fotodiode

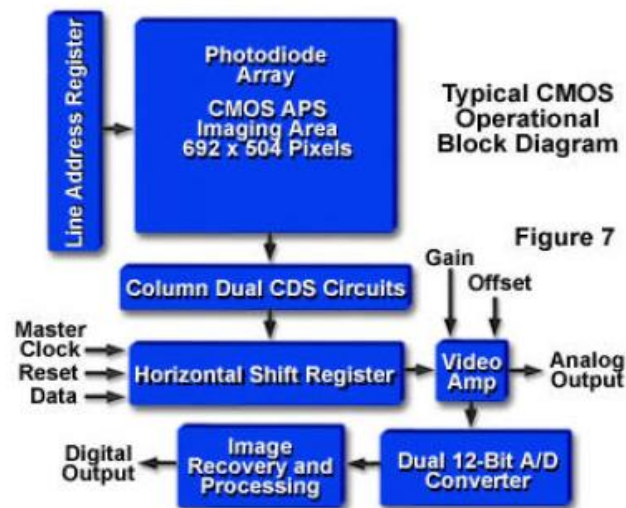
Eines der größten Probleme des APS – Designs ist das relativ hohe Level von „Fixed Pattern Noise“ (FPN), einer Art geräteabhängigen, unveränderlichen Rauschens, das durch unterschiedlich starke Ladungsverstärkung verschiedener r Pixel hervorgerufen wird. Als Resultat erhält man eine Rauschschablone, die von Bild zu Bild konstant bleibt und gerätecharakteristisch ist. In vielen Fällen kann FPN durch Nachbearbeitung mit einem Analogsignalprozessor oder durch Subtraktion eines dunklen Bildes (Flat-Field-Correction) stark reduziert werden.

Arten von CMOS – Chips

Es gibt zwei Arten von Pixelelementen in modernen CMOS – Sensoren: die Fotodioden und die Fotogates. Fotodioden sind empfindlicher für sichtbares Licht, besonders im kurzwelligen Bereich (blau) des Spektrums. Fotogates haben meist größere Pixelgebiete, aber einen geringeren Füllfaktor und weniger Blauempfindlichkeit als Fotodioden.



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.



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 *2) 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.

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

Verbesserung der Lichtausbeute - Mikrolinsen auf Digitalkameras

Mikrolinsen (Lenslets) werden benutzt, um die Lichtausbeute der CCDs (besonders bei Interline-Verfahren und bei Vorhandensein von Drains) als auch bei CMOS – Geräten zu erhöhen. Man verwendet sie meist, wenn die Pixelapertur stark unterhalb von 1 liegt. Die Mikrolinsen sorgen dafür, dass das ankommende Licht nur auf die Fotodioden anstatt auf „blinde“ Bereiche innerhalb des Pixels fällt, um Informations-verluste möglichst gering zu halten.

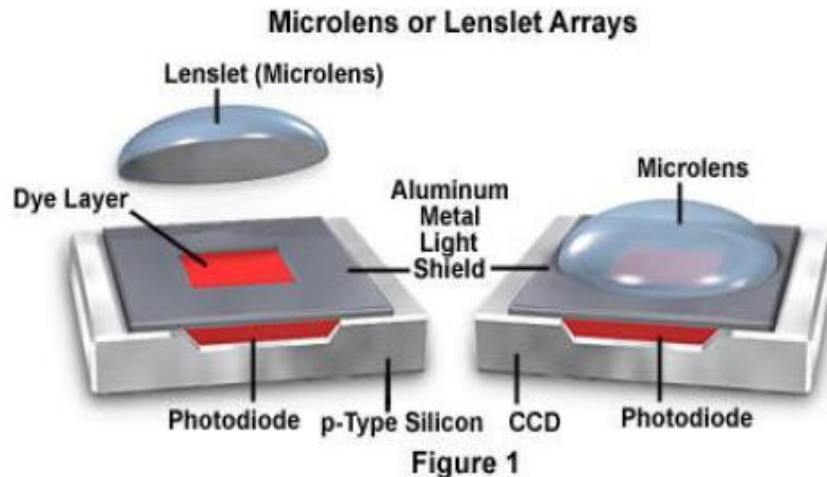


Abb. 5.4.

Die Abb. 5.4. zeigt ein typisches Pixel- Linsenkonstrukt. Die Linse wird genau über den Farbfilter und den Metallschild eines Pixels gelegt. Jede Linse besitzt meist eine hochwertige Oberfläche aus Quarz. Der Durchmesser reicht von mehreren hundert bis zu 10 Mikronen, je nach Anwendung. Die Qualität der Linsen ist, was die physikalischen Eigenschaften betrifft, so hoch, dass sie ohne weiteres mit ihren „großen Geschwistern“ mithalten kann. Mikrolinsen erhöhen die Lichtausbeute im Vergleich zu linsenlosen Pixeln um bis zu 300% und damit auch die Lichtempfindlichkeit der Kamera.

In Abbildung 5.5. sieht man den Vergleich zweier Pixel, wobei der eine eine Linse besitzt, um das Licht auf die Fotodiode zu bündeln. Der andere Pixel besitzt keine Linse. Die Fotodiode ohne Linse sammelt wesentlich weniger Licht als diejenige mit Linse. In CCDs kann der optische Füllfaktor um bis zu 20% eingeschränkt sein. Mit Linse kann man je nach Herstellungsverfahren wieder 100% erreichen. Bei CMOS – Geräten ist der Zuwachs oftmals noch höher.

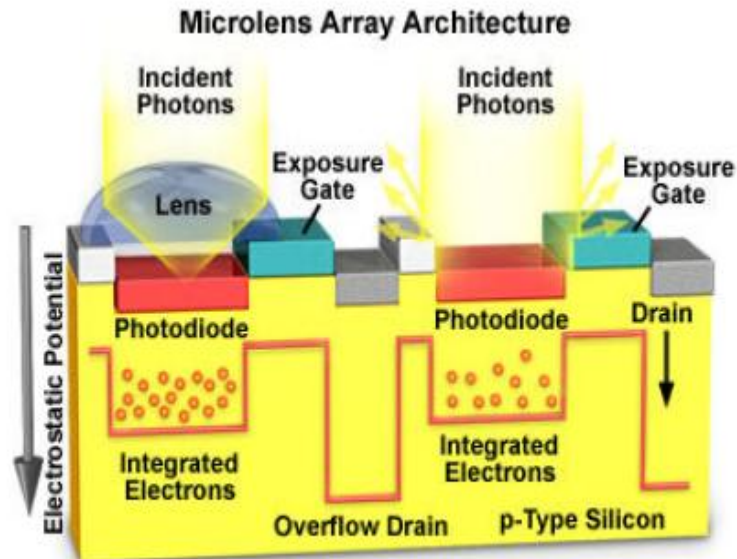
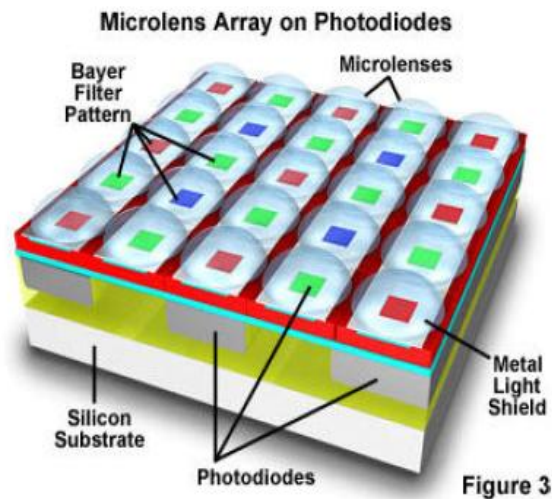


Figure 2

Abb. 5.5.

Dabei ist festzuhalten, dass die Architektur der Linse abhängig von der Architektur der Kamera selbst ist. Auch die Dicke der Polysiliziumgates beeinflusst die Fähigkeit der Dioden, Licht zu erfassen. Die Nachteile der Linsen (höherer Aufwand und Kosten in der Herstellung) werden bei weitem durch die Vorteile höherer Lichtempfindlichkeit aufgewogen. Ein Problem tritt allerdings auf, wenn Linsen Lichtstrahlen bündeln, die eigentlich nicht im Gebiet des Pixels liegen. Mit kleiner werdenden Pixeln wird es zudem zunehmend schwieriger, hinreichend kleine Linsen herzustellen. Mikrolinsen höherer Qualität werden benötigt, um Bilder auf neuen Kameras abzubilden, was nicht ganz einfach ist. Auch die Einheitlichkeit von den Linsenfeldern ist eine Forderung, die nur bedingt erfüllt werden kann.



ein Linsenfeld

Abb. 5.6.

Filterlos mit vollfarbigen Pixeln – Neueste Entwicklungen (2002)

Um von den Mosaikformen gängiger Bildaufnehmer wegzukommen, wurde vor kurzem ein System für Digitalkameras entwickelt, dass anhand der unterschiedlich hohen Eindringtiefen der Photonen die Farbinformationen in drei Schritten auslesen kann (siehe Abb. 5.11.). Im Vergleich zum vorhergehenden Beispiel, kann diese Architektur die Farbkanäle parallel statt sequentiell erfassen.

jeder der drei Chips erfasst einen Farbkanal

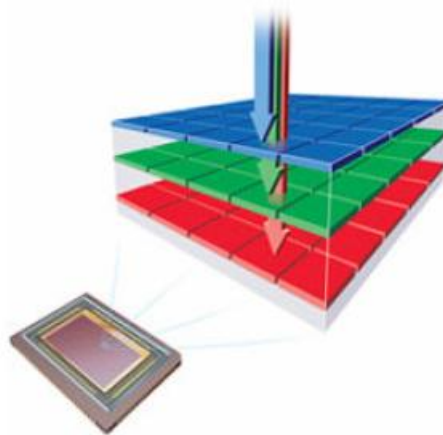


Abb. 5.11.

Eine solche Kamera, basierend auf **CMOS-Technologie** wurde Ende Februar 2002 auf der PMA (Photo Marketing Association) in Orlando/Florida vorgestellt. Sie soll neue Maßstäbe in punkto Preis und Auflösung setzen.

Das Konzept unterscheidet sich von gängigen CCD-Sensoren und CMOS-Wandlern und nähert sich dem Prinzip der herkömmlichen Fotografie an. Es treten hierbei keine Moiré – Effekte und Farbsäume auf. Angewandt wurde diese 3-Chip-Technologie schon etwas früher bei einigen digitalen Videokameras. Um die Analogie dieses Verfahrens zum Prinzip der herkömmlichen Fotografie deutlich zu machen soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass chemischen Filme auch mehrschichtig sind und dabei verschiedene Schichten für die drei Grundfarben rot, grün und blau besitzen. Die neue Kamera besitzt drei übereinander liegende Chips, von denen jeder für die Erfassung einer Farbkomponente zuständig ist. Das Licht dringt je nach Wellenlänge unterschiedlich tief in die Halbleiterelemente ein, d.h. längere Wellenlängen werden erst später absorbiert als kürzere.

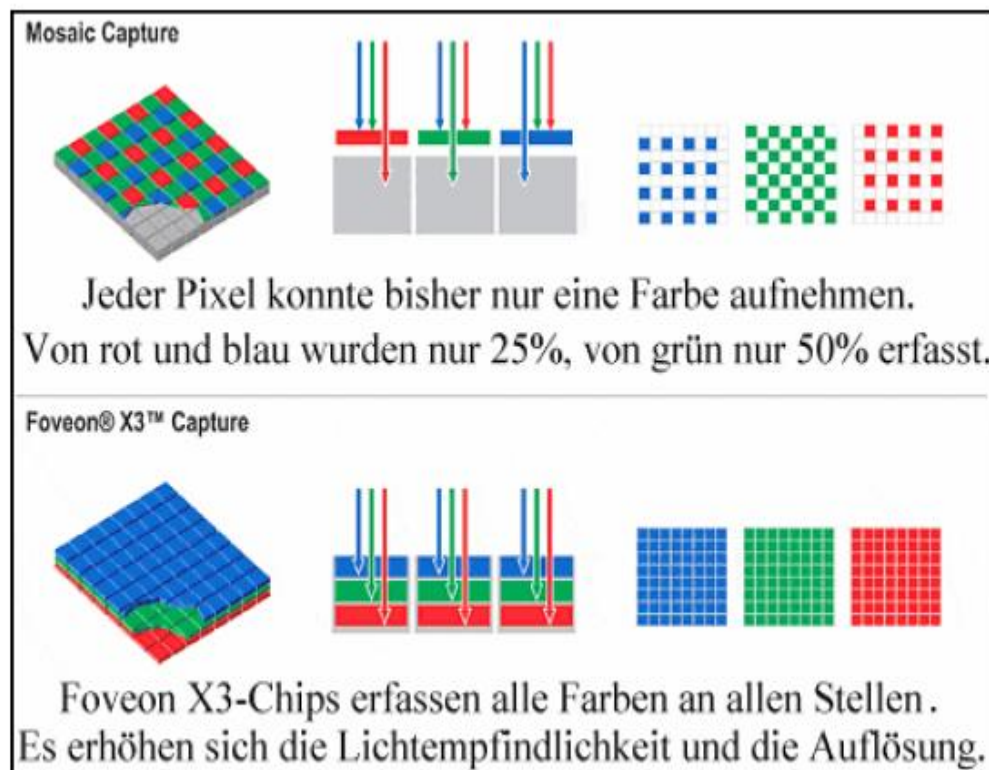


Abb. 5.12.

Diese Kamera hat zudem die dreifache Lichtempfindlichkeit und es ist keine kosten- und zeitraubende Interpolation erforderlich. Die erste Version einer solchen Kamera löst 2304x1536 Pixel auf, was der dreifachen Auflösung von Kameras mit „Mosaikchips“ entspricht. Außerdem kann man bei geringen Lichtverhältnissen ganze Pixelgruppen (2x2 oder 4x4) zusammenschalten, man

nennt das „Variable Pixel Size“ (VPS). Die Auflösung verringert sich dabei wie bei einem lichtempfindlichen Film. Auch bewegte Videoaufnahmen mit einer Qualität, die der von Camcordern ebenbürtig ist, sind möglich.

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 Aufnahmegерäte 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 Bildaufnahmegерäte, 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 den selben 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:

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 Lichtauffang-elemente 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.

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 zu dem 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, besserer Optik und externer Elektronik arbeitet, kann man die Bildqualität von CCD-Systemen (noch) nicht erreichen.

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.

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 maschinellem 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 Shutter“, 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.

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.

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 Zeilenwiederholraten 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.

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.

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.

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 führen können werden vermieden. CMOS – Systeme können auch besser integriert werden als CCDs. Taktung, Signalprozessor, ADC, Interface und andere Funktionen befinden sich oftmals auf einem einzigen Chip. Dabei kann die CMOS – Kamera viel kleiner sein, als die CCD - Kamera. Die Integration kostet aber viel Entwicklungsaufwand. Auch wenn die Bildeinheit von CMOS – Systemen oft stromsparender als die von CCDs ist, können andere Bauteile schlechter im Stromverbrauch sein, weil CCDs optimierte Analogsysteme, Digital- und Mixed-Signalprozessoren verwenden. Diese Faktoren stellen auf Systemlevel die Energieeffektivität von CMOS - Geräten wieder in Frage.



Abbildung: CMOS-Chip von Sony

Merkmals- und Leistungsvergleich – Tabellarische Zusammenfassung

Merkmal	CCD	CMOS
Signal am Pixelausgang	Elektronenpaket	Spannung
Signal am Chipausgang	Spannung (analog)	Bits (digital)
Signal am Kameraausgang	Bits (digital)	Bits (digital)
Füllfaktor / Apertur	hoch	mittel
Verstärkungsstörungen	keine	mittel
Systemrauschen	niedrig	mittel
Systemkomplexität	hoch	niedrig
Sensorkomplexität	niedrig	hoch
Kamerakomponenten	PCB + verschiedene Chips + Linse	Chip + Linse
Forschungs- und Entwicklungskosten	anwendungsabhängig	anwendungsabhängig
Systemkosten	anwendungsabhängig	anwendungsabhängig
Leistung	CCD	CMOS
Reaktivität	mittel	etwas besser
Dynamik	hoch	mittel
Pixelgleichheit (Uniformität)	hoch	niedrig bis mittel
Uniforme Belichtungszeit	schnell, zusammen	schwach
Geschwindigkeit	mittel bis hoch	höher
Windowing	begrenzt	erweitert
Antiblooming	hoch bis gar nicht	hoch
Spannungsversorgung und Taktung	hohe Spannung, verschieden	niedrige Spannung, einfach

Entwicklungsperspektiven beider Systeme

Das Geld und die Beachtung, die für CMOS – Geräte aufgebracht werden, deuten darauf hin, dass sich die Leistung von CMOS – Geräten in Zukunft stark verbessern wird, so dass sogar die Grenze zwischen CCD und CMOS in punkto Bildqualität verschwimmen könnte. Aber in absehbarer Zeit werden CCD und CMOS Bildsensoren noch sehr verschiedenartig bleiben, wobei jede von den zwei Technologien ihre bestimmten Vorteile gegenüber der jeweils anderen Technologie besitzt.

Stand der Technik im Alltag

Der Verfasser ging kurz der Frage nach, welche Digitalkameras zurzeit für den Normalverbraucher erhältlich sind, welche der beschriebenen technischen Merkmale angewandt werden und in wie weit die Verkäufer sich mit den Geräten auskennen.

In vier Filialen ^{*3)} wurden dazu Verkäufer befragt, welche der folgenden Features in den hauseigenen Kameras vorhanden seien: CCD-, CMOS-, Full-Frame- bzw. Frame-Transfer-Technologien, Mikrolinsen, 3-Chip oder 1-Chip-Technologien. In den ersten drei Läden konnte zu allen Punkten entweder keine, bzw. sogar nur falsche Auskunft gegeben werden. Erst am Ende wurde auf ein Geschäft verwiesen, in dem ein Hobbyfotograf arbeitete. Im Folgenden wird seine Einschätzung der Marktsituation ausgeführt:

Momentan befinden sich auf dem Markt für Digitalkameras lediglich Geräte, die auf CCD-Technologie basieren. Neuartige Kameras, die mit CMOS-Chips arbeiten sind noch sehr teuer, aber haben große Vorteile, vor allem in der Geschwindigkeit. Manuelle Verschlüsse werden nicht mehr verwendet. Belichtungszeiten können nur bei teuren Geräten variiert werden, ansonsten liegt die Standardbelichtungszeit bei ca. 1/125 Sekunden. Die durchschnittliche Bildpunktanzahl liegt bei 3 Megapixeln. Mikrolinsen werden bei allen Geräten im Angebot verwendet. 3-Chip-Kameras auf CMOS-Basis sind noch nicht auf dem Markt, sollten aber aufgrund überlegener Bildqualität den Hauptanteil am zukünftigen Sortiment ausmachen. Außerdem werden CMOS-Kameras nach Meinung eines Verkäufers auf lange Sicht die CCD-Systeme aufgrund ihrer Geschwindigkeitsvorteile ablösen. Nebenbei sei bemerkt, dass trotz aller technischen Errungenschaften die herkömmliche Fotografie bei bis zu 30 Megapixeln pro Bild in Sachen Qualität so schnell nicht zu schlagen sein wird.