

Bildsensoren

Material für die Gruppenarbeit BOS12

CCD

OSZ Handel I

Alexander Baldauf (Student Master of Education)

baldauf@informatik.hu-berlin.de

27.02.2009

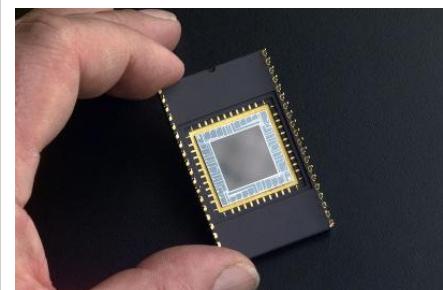
CCD-Sensor

Ein **CCD-Sensor** ist ein Charge-coupled Device, das als Sensor ausgelegt ist. CCDs wurden im Jahr 1969 eigentlich zur Datenspeicherung entworfen.^[1] Es wurde jedoch schnell bemerkt, dass diese Bauteile lichtempfindlich sind und ein zur eingestrahlten Lichtmenge proportionales Signal ausgeben. Bereits 1970 wurde ein solcher CCD-Sensor gebaut^[2], und 1975 wurden die ersten CCDs mit einer für Fernsehkameras ausreichenden Anzahl an Bildpunkten hergestellt. Seit ca. 1983 werden CCD-Sensoren auch in der Astronomie eingesetzt.

Zweidimensionale CCD-Sensoren werden in Videokameras und Digitalkameras, eindimensionale Arrays (CCD-Zeilensensoren) u. a. in Faxgeräten, Spektrometern, Scannern und Barcodelesern eingesetzt.

Funktionsweise und Aufbau

CCD-Bildsensoren bestehen meistens aus einer Matrix (seltener einer Zeile) mit lichtempfindlichen Fotodioden, die Pixel genannt werden (vom englischen *picture elements*). Diese können rechteckig oder quadratisch sein, mit Kantenlängen von weniger als 3 µm bis über 20 µm. Je größer die Fläche der Pixel, desto höher ist die Lichtempfindlichkeit und der Dynamikumfang des CCD-Sensors, desto kleiner ist aber, bei gleicher Sensorgröße, die Bildauflösung.



Hochempfindlicher CCD-Sensor für die Astronomie

Die meisten CCDs sind MIS-Strukturen: Über einem dotierten Halbleiter liegt eine isolierende Schicht, auf der optisch transparente elektrische Leiter (Elektroden) angebracht werden. Darunter sammeln sich die Ladungsträger (meist Elektronen, manchmal auch „Löcher“). Details werden im Abschnitt Physikalische Grundlagen behandelt. Zwischen den Pixeln verlaufen oft weitere feine elektrische Leitungen, die zum Auslesen und zur Abschirmung überbelichteteter Pixel dienen.

Das einfallende Licht überträgt durch den inneren photoelektrischen Effekt seine Energie auf die Elektronen des Halbleiters. Dabei entstehen gleichzeitig freie Elektronen (negativ) und positiv geladene „Löcher“, die sich aufgrund einer angelegten Spannung voneinander trennen. Die Ladungen fließen jedoch nicht sofort nach außen ab, wie bei einer Photodiode, sondern werden in der Speicherzelle selbst, in einem sogenannten Potentialtopf gesammelt, der wie ein Kondensator Ladungen speichert. Deren Menge ist dabei proportional zur eingestrahlten Lichtmenge, wenn rechtzeitig ausgelesen wird, bevor die Leerlaufspannung der Photodiode erreicht ist.

Bei Überbelichtung könnten Ladungen aus dem Potentialtopf einer Zelle in die Nachbarzellen übertreten; dieser Effekt ist als Blooming bekannt. Dagegen hilft ein „anti-blooming gate“, das ähnlich einem Überlauf funktioniert, also überschüssige Ladungen ableitet. Allerdings kommt es dadurch vor allem bei langen Belichtungszeiten zu einer Nichtlinearität zwischen Lichtmenge und Ausgangssignal; daher verzichten CCD-Sensoren für wissenschaftliche Anwendungen oft darauf.

Nach der Belichtung werden die Ladungen (engl. *charge*) ähnlich einer Eimerkette (daher die Bezeichnung Eimerkettenschaltung) schrittweise verschoben, bis sie schließlich als

Ladungspakete, eines nach dem anderen, den Ausleseverstärker erreichen. Es wird eine von der Ladung und somit der Lichtmenge abhängige elektrische Spannung ausgegeben. Der Mechanismus des Ladungstransfers wird in Charge-coupled Device genauer beschrieben.

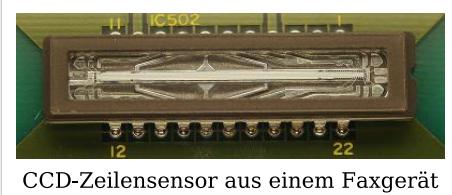
Das Ausgangssignal des Sensors ist somit seriell. Die Ladungen der einzelnen Pixel werden hintereinander ausgegeben, wogegen das ursprüngliche Bild parallel entstand, indem alle Pixel gleichzeitig belichtet worden sind. Bei den meisten CCDs für Videokameras werden jeweils nur Halbbilder (d. h., erst alle ungeraden, dann alle geraden Zeilen) ausgegeben (Zeilensprungverfahren, engl. *interlaced*). Für alle anderen Zwecke sind „progressive scan“ CCDs üblich, bei denen die Zeilen in ihrer natürlichen Reihenfolge hintereinander ausgegeben werden.

Während des Verschiebens der Ladungen sollen keine weiteren Ladungen durch Belichtung hinzukommen, um die Bildinformation nicht zu verfälschen. Es wurden verschiedene Anordnungen zur Lösung dieses Problems entwickelt:

- Full-Frame-(FF) (mit zusätzlichem mechanischen Verschluss),
- Frame-Transfer- (FT),
- Interline-Transfer- (IT)
- und Frame-Interline-Transfer-CCDs (FIT).

Bauformen: Matrix und Zeile

Außer CCD-Chips mit zweidimensionaler Anordnung von Bildpunkten, also Bildsensoren, sind auch CCD-Linien in Gebrauch, so genannte Zeilensensoren. Diese Sensoren liefern keine Bilder, sondern werden z. B. in Spektrometern, in Faxgeräten, in der Industrie zur Überwachung von Fließbändern oder bei Scannerkassen und in Scannern von Supermärkten zum optischen Abtasten (Scannen) verwendet.



CCD-Zeilensensor aus einem Faxgerät

Front-Illuminated versus Back-Illuminated

Bei den meisten CCD-Chips wird die Oberseite des Siliziumplättchens beleuchtet, also die Seite, auf der die Halbleiterstrukturen hergestellt wurden (*front-illuminated CCD*). An der Oberfläche befinden sich dann Strukturen, die nicht lichtempfindlich sind (zum Beispiel Elektroden aus polykristallinem Silicium). Vor allem kurzwelliges (blaues und ultraviolettes) Licht wird aber schon in den obersten Schichten absorbiert und gelangt nicht mehr in den darunter liegenden lichtempfindlichen Bereich. Dieses Problem wird bei so genannten *back-illuminated-CCDs* vermieden. Dazu wird das Siliziumplättchen bis auf eine Dicke von 0,01 mm bis 0,02 mm abgeschliffen und abgeätzt und mit der lichtempfindlichen „Rückseite“ nach oben eingebaut. Dieses Herstellungsverfahren ist sehr teuer, daher werden Back-Illuminated-CCDs nur dort verwendet, wo es auf hohe Empfindlichkeiten (Quantenausbeute) für kurzwelliges Licht ankommt, also zum Beispiel in der Spektroskopie oder Astronomie. Ein Nachteil der Back-Illuminated-CCDs ist eine ungleichmäßige Empfindlichkeit („etaloning“) bei längeren Wellenlängen, weil durch Hin- und Herspiegelung des Lichts an der vorderen und hinteren Oberfläche Interferenzen wie im Fabry-Pérot-Interferometer auftreten.

Physikalische Grundlagen

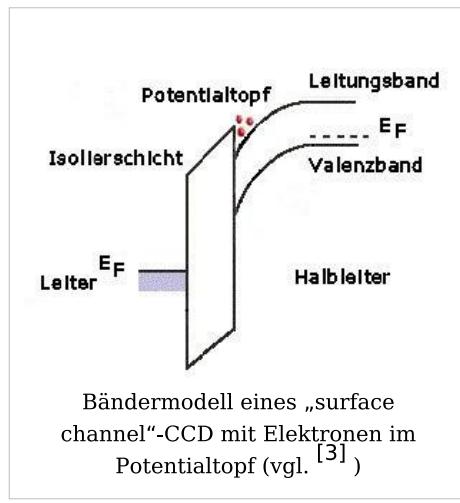
Auf einem dotierten Halbleiter (meist Silicium) liegt eine optisch transparente elektrisch isolierende Schicht, beispielsweise Siliciumdioxid. Darauf sind viele Elektroden aus einem leitfähigen und zugleich optisch transparenten Material aufgebracht. Für die Elektroden wird meist polykristallines Silicium („Polysilicium“) verwendet, seit Kurzem auch Indium-Zinn-Oxid. Wegen der Ähnlichkeit der Elektroden mit denen von MOSFETs werden die Elektroden auch als Gate-Elektroden bezeichnet. Bei MOSFETs sind die Gates aber 10 nm statt 10 µm lang und die Ladung wird mit 1 bis 3,3 V getrieben statt mit Potentialhöhen von 1 V, wodurch höhere Taktraten als 40 MHz möglich sind. Die Elektroden sind über Aluminium-Kontakte von außen ansteuerbar.

Legt man an eine Elektrode eine Spannung an (positiv bei p-dotiertem Halbleiter, negativ bei n-Dotierung), so bildet sich unterhalb der Isolierschicht an der Oberfläche des Halbleiters ein Gebiet, welches als Potentialtopf bezeichnet wird. In diesem Gebiet ist die Ladungsträgerkonzentration der Majoritätsladungsträger sehr gering.

Photonen, deren Energie größer als die Bandlücke des Halbleiters ist, heben Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband an; es entstehen also Elektronen-Loch-Paare im Halbleiter. Dies ist der so genannte innere photoelektrische Effekt. Die dabei erzeugten zusätzlichen Minoritätsladungsträger, das sind entweder Elektronen oder „Löcher“, sammeln sich im Potentialtopf während die gleichzeitig erzeugten Majoritätsladungsträger ins Innere des Halbleiters wegfließen.

Durch Variieren der angelegten Spannung in benachbarten Elektroden kann der Potentialtopf so geformt werden, dass die darin sich befindenden Ladungsträger zum Auslesen in die gewünschte Richtung wandern.

Der Grundaufbau eines CCD konnte weiter verbessert werden. Eine wichtige Ergänzung ist eine im Halbleiter direkt unter dem Isolator liegende Schicht mit gegensätzlicher Dotierung. Dadurch entsteht ein so genannter „buried channel“, das heißt, es sammeln sich die von den Photonen erzeugten Minoritätsladungsträger nicht mehr direkt an der Grenzfläche zwischen Isolator und Halbleiter sondern im Inneren des Halbleiters. Die Minoritätsladungsträger erreichen dann nicht mehr die Grenzfläche zwischen Isolator und Halbleiter, wo die dort immer vorhandenen Kristalldefekte stören - es können an dieser Grenze keine Ladungen mehr „eingefangen“ werden oder „hängen bleiben“. „Buried channel“-CCDs haben (im Gegensatz zu den zuerst beschriebenen „surface channel“-CCDs) geringeres Rauschen und eine wesentlich verbesserte Effizienz des Ladungstransfers, allerdings können weniger Ladungsträger je Pixel gespeichert werden.



Kenngrößen für die Qualität von CCD-Bildsensoren

Die wichtigsten Kenngrößen zur Charakterisierung der Qualität von CCD-Chips sind:

- Die Quantenausbeute, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein einfallendes Lichtphoton ein Elektron auslöst. Die Quantenausbeute von CCDs hängt von der Wellenlänge des Lichts ab und kann über 90 % betragen (Fotografischer Film zum Vergleich: 5-10 %).
- Der Dunkelstrom der lichtempfindlichen Zellen. Der Dunkelstrom ist nicht für alle Pixel völlig gleich, es kommt daher zu Dunkelstromrauschen, das eine Quelle des Bildrauschen ist. Weiter können einzelne „hot pixels“, also Pixel mit besonders hohem Dunkelstrom auftreten.
- Die Anzahl der Ladungen, die in einem Pixel gespeichert werden können („full well capacity“ oder „well depth“).
- Das Verhalten, wenn durch Überbelichtung in einzelnen Pixeln mehr Ladung erzeugt wird, als gespeichert werden kann. Tritt die Ladung in benachbarte Pixel über, spricht man von „Blooming“. Viele CCD-Kameras vermeiden diesen Effekt, indem die überschüssigen Ladungen abgeleitet werden („anti-blooming gate“), dadurch kann aber

auch schon Ladung verloren gehen, bevor ein Pixel wirklich voll ist. Der Zusammenhang zwischen Lichtmenge und Ladung ist dann nicht mehr linear, und genaue Messungen sind nicht mehr möglich.

- Die Effizienz des Ladungstransports zum Ausleseverstärker (Charge Transfer Efficiency).
- Das Rauschen des Ausleseverstärkers (Ausleserauschen, „readout noise“).

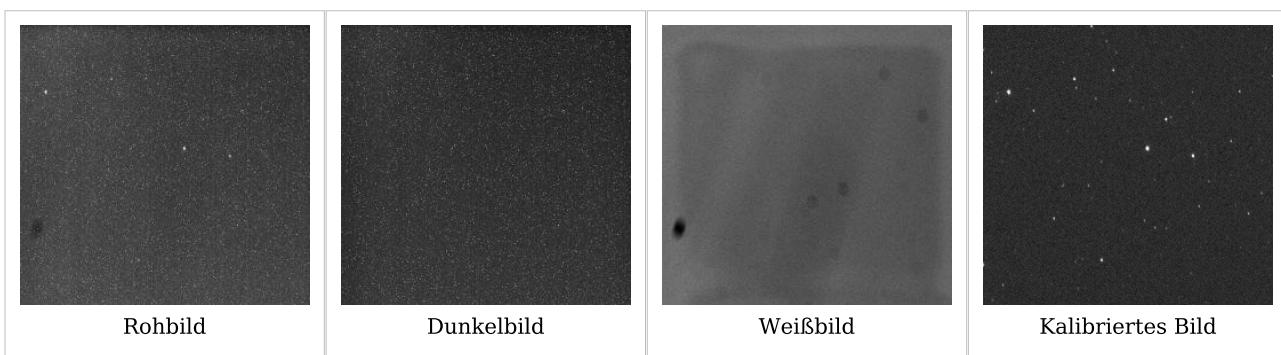
Dunkelstrom und Rauschen werden bei hochempfindlichen Kameras durch Kühlen des CCD-Chips verringert. Das Rauschen kann zum Beispiel auf unter drei Elektronen pro Pixel und Stunde durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff gedrückt werden.

Kalibrierung

Um Helligkeitsunterschiede im Bild, die auf Verunreinigungen auf dem CCD-Chip (Staub), ungleichmäßige Empfindlichkeit der Pixel, oder die verwendete Optik (Vignettierung, Reflexe) zurück gehen, ausgleichen zu können, wird das aufgenommene Bild durch ein Weißbild dividiert (Weißbild- oder Flat-Field-Korrektur) und mit dem Mittelwert des Weißbilds multipliziert. Zur Beseitigung des aus dem Dunkelstrom hervorgegangenen Bildrauschen wird bei Langzeitaufnahmen (z. B. in der Astronomie) davor noch ein Dunkelbild abgezogen (Dunkelbild- oder Dark-Frame-Korrektur). Das Ergebnis ist ein kalibriertes Bild.

Die Bilder zeigen die Kalibrierung am Beispiel einer astronomischen Aufnahme:

- Das Rohbild zeigt zahlreiche „hot pixels“, die zu einem stark verrauschten Bild führen. Lichtschwache Sterne gehen in diesem Rauschen verloren. Dunkle Flecken im Rohbild röhren von Staub in der CCD-Kamera her.
- Das Dunkelbild wurde bei gleicher Belichtungszeit und Betriebstemperatur wie das Rohbild, allerdings bei geschlossenem Kameraverschluss, aufgenommen. Es erfasst somit den während der entsprechenden Belichtungszeit aufgelaufenen Dunkelstrom.
- Das Weißbild wurde aufgenommen, während das Instrument auf eine gleichmäßig erhelle Fläche ausgerichtet war. Es erfasst Unregelmäßigkeiten in der Ausleuchtung des Bildes (zum Beispiel durch Staub) und in der Empfindlichkeit der einzelnen Pixel.
- Im kalibrierten Bild sind diese Defekte behoben. Auch lichtschwache Sterne sind hier erkennbar. Das kalibrierte Bild kann zur quantitativen Analyse, beispielsweise zur Messung der scheinbaren Helligkeit der Sterne, herangezogen werden. Ohne die Kalibrierung würde eine derartige Messung zu verfälschten Messwerten führen.



3. CCD – Ladungsgekoppeltes Bauelement

Genesis, Aufbau, Funktion und Produktion von CCDs

3.1. Kurzer historischer Abriss

CCDs wurden in den 60er Jahren von Forschern der Bell Laboratorien in den USA entwickelt. Ursprünglich sollte ein neuer Typ von Speicherschaltkreisen für Computer entwickelt werden. Spätere Studien deuteten aufgrund der Fähigkeit des neuen Chips, Ladungen zu transportieren und mit Licht zu interagieren darauf hin, dass sich für ihn auch andere Anwendungsgebiete wie die Signalverarbeitung und die Bilderfassung ergeben könnten. Die ersten Hoffnungen auf einen neuen Speicherchip sind dagegen bis heute völlig verschwunden. Vielmehr ist die CCD nun das aussichtsreichste Mittel, als Allzweck-Bilderfassungsbauteil die gewöhnliche Fotografie durch die digitale ersetzen zu können.

3.2. Aufbau einer CCD

CCDs werden ähnlich wie integrierte Schaltkreise auf Silizium-Wafern hergestellt. Die Wafer werden in vielen komplexen fotolithografischen Schritten produziert (siehe Abb. 3.1.). Sie werden dabei geätzt, es werden Ionen implementiert, dünne Filme aufgebracht, sie werden metallisiert und passiviert, damit sie später verschiedene Funktionen ausführen können. Das Silizium - Substrat wird dabei elektrisch zu p-Silizium dotiert, also zu einem Material mit vielen elektrisch positiven Elektronenlöchern. Viele Chips werden so auf einem Wafer hergestellt, mit einer Diamantsäge ausgeschnitten, getestet und mit Hilfe eines Keramik- oder Polymergehäuses geschützt verpackt. Die vordere Öffnung wird durch eine Glas- oder Quarzscheibe, durch die Licht hindurchkommen und die Fotodioden beleuchten kann, verschlossen.

CCDs bestehen aus einer Matrix von Fotodioden. Die Fotodioden wandeln Lichtenergie in Form von Photonen in elektrische Ladungen um. Die Elektronen, die durch Interaktion von Licht mit Siliziumatomen entstehen, werden in einem Ladungspool gesammelt. Später wird jedes so erzeugte Ladungspaket mit Hilfe von Schieberegistern über den Chip zum Ausgang und zu einem Verstärker transportiert. Folgende Skizze zeigt verschiedene Komponenten, die zu einer CCD gehören.

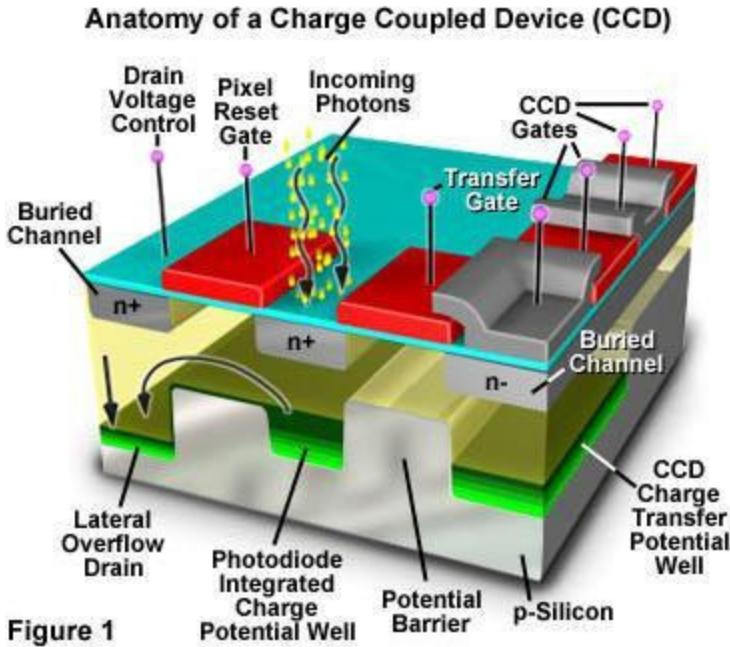


Abb. 3.2.

3.3. Funktionsweise einer CCD

Wenn ultraviolettes, sichtbares oder infrarotes Licht auf ein Siliziumatom einer CCD trifft, entsteht meist ein freies Elektron und durch die zeitweise Abwesenheit des Elektrons im Kristall ein elektrisch positiv geladenes Loch (Abb. 2.1.). Das freie Elektron wird nun tief im Siliziumsubstrat in einem Ladungspool gesammelt, während sich das Loch vom Ladungspool und aus dem Siliziumsubstrat weg bewegt. Die Ladungspools können nur eine bestimmte maximale Anzahl von Ladungen speichern, wodurch die letztlich die Dynamik einer Kamera bestimmt wird. Einzelne Fotodioden sind primär voneinander isoliert, können einander aber unter bestimmten Umständen ungewollt beeinflussen. Das führt dann zu dem Problem, das man „Blooming“ nennt (Kapitel 5.2.).

Der Auslesevorgang bei einer CCD ist, was die Auslesereihenfolge für die einzelnen Bildpunkte angeht, sehr unflexibel. Bildpunkte können nicht einzeln adressiert werden. Das Hauptmerkmal einer CCD ist das große Feld von in Reihe geschalteten Schieberegistern. Nachdem innerhalb einer jeden Fotodiode Elektronen gesammelt wurden, werden die Elektronenpakete zur Elektrode gebracht. Ist der Ladungspool mit Elektronen aus der Verarmungszone gefüllt, werden die Ladungspakete durch eine Kombination von parallelen und seriellen Transfers so zu einem einzigen Ausgangsknoten an der Ecke des Chips geführt. Der Ausleseprozess ist oft sogar schnell genug, um zeitgleich zu einem erneuten Belichtungsvorgang für das nächste Bild zu erfolgen.

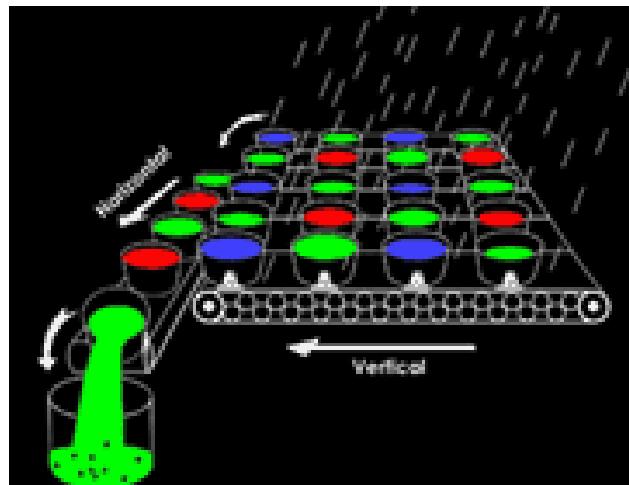


Abb. 3.3.

Eimerkettenmodell

Das Bild wird im ersten Schritt zeilenweise und parallel ausgelesen. Die Elektronen werden dabei von Fotodiode zu Fotodiode weitergeleitet (in jeweils 2; 3 oder 4 Schritten). Diese Verschiebung erfolgt, indem der Ladungspool negativ gepolt verbleibt. Die jeweils nächste Elektrode wird positiv gepolt. Der Taktgeber für das Verschieben arbeitet in Zyklen. Dabei werden die Spannungen bei verschiedenen Elektroden so manipuliert, dass die Ladungen über die gesamte CCD transportiert werden können.

Nachdem man mit den parallelen Schieberegistern ganze Zeilen ausgelesen hat, gelangen die Ladungen zu einem seriellen Schieberegister. Jedes Paket repräsentiert nun einen Bildpunkt, der unter Kontrolle einer Horizontaltaktung zum Ausgangsverstärker des Chips gebracht wird. Nachdem die gesamte Zeile ausgelesen (verschoben) wurde, wird die neue Zeile eingelesen. Im Ausgangsverstärker wird von jedem Bildpunkt die Stärke der Ladung ermittelt. Als Ergebnis erhält man eine analoge Rasterabtastung aller fotogenerierten Ladungen, also des gesamten 2D-Feldes von Fotodioden.^{*1)}

Um die Bildqualität zu verbessern, gibt es gegenwärtig eine ganze Reihe Verfahren, wie z.B. Antiblooming, Antivignetting, Shuttering, Mikrolinsen(Lenslets), Pixel Binning, Taktungsverfahren, Scanformate und viele andere. Diese Verfahren sind vor allem für das Verständnis der Arbeitsweise von Digitalkameras sehr wichtig.

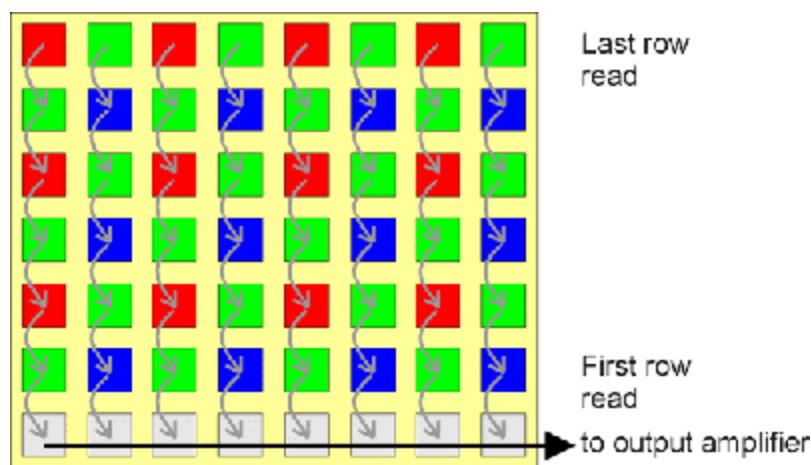


Abb. 3.4.

¹⁾ Folgende gedankliche Illustration soll den Auslesevorgang verdeutlichen: Man stelle sich ein Feld von Ameisen, die in Reihen und Gliedern zueinander angeordnet stehen, vor. Aufgabe ist es, von jeder Ameise die Körpergröße zu ermitteln. Ganz rechts vorne steht die Ameise mit dem Maßband, an der alle anderen vorbei müssen. Die gesamte vordere Reihe der Ameisen tritt dazu auf Kommando geschlossen (parallel) nach vorn, alle anderen Reihen rücken nach. Im weiteren Verlauf marschiert die erste Reihe der Ameisen einen Schritt nach rechts, und die rechteste Ameise dieser Reihe wird vermessen. Sie kann dann gehen und die erste Reihe tritt wieder einen Schritt nach rechts, usw., bis alle Ameisen aus der vorderen Reihe hintereinander (sequentiell) vermessen wurden. Dann treten alle verbleibenden Reihen wieder geschlossen um einen Schritt nach vorn (parallel) und der Vorgang wiederholt sich für die nun vordere Reihe. Es wird sofort klar, dass wenn man die Größe der Ameise ganz hinten links ermitteln will, erst alle anderen Ameisen vermessen worden sein müssen. Das direkte Herausgreifen und Vermessen einer beliebigen Ameise, oder um wieder auf die CCD – Kamera zurückzukommen, eines beliebigen Bildpunktes, ist somit nicht möglich.

6. Vergleich von CCD mit CMOS, Vorteile, 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 Lichteinfallselemente 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 Herstellungsunterschiede. 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 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 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-, kapazitativen- 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 röhrt 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 höhere 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