

Digitalkameratechnologien

Eine vergleichende Betrachtung

CCD kontra **CMOS**

Daniel Göhring

12.08.2002

Prof. Dr. Beate Meffert

Technische Informatik

Humboldt Universität zu Berlin



Gliederung

1. Einleitung

2. Physikalische und technische Grundlagen

- 2.1. Der Fotoeffekt
- 2.2. Der Feldeffekttransistor (MOS)
- 2.3. Das CMOS - Prinzip
- 2.4. Zu einigen Wechselwirkungen von Photonen mit Silizium

3. CCD – Ladungsgekoppeltes Bauelement Genesis, Aufbau, Funktion und Produktion von CCDs

- 3.1. Kurzer historischer Abriss
- 3.2. Aufbau einer CCD
- 3.3. Funktionsweise einer CCD

4. CMOS – Gegensätzliche verschaltete Transistoren

- 4.1. Kurzer historischer Abriss
- 4.2. Aufbau eines CMOS - Sensors
- 4.3. Arten von CMOS – Chips

5. Wesentliche Konzepte für die digitale Bilderfassung im Zusammenhang mit der CCD - Technologie

- 5.1. Aufnahme und Speicherung von Bildern - Full-Frame, Frame-Transfer, Interline-Transfer
- 5.2. Überbelichtung bei CCDs – Blooming
- 5.3. Verbesserung der Lichtausbeute - Mikrolinsen auf Digitalkameras
- 5.4. Verbesserung der Quanteneffektivität von CCDs – Frontside- und Backside Illumination
- 5.5. Farbkanalseparierende sequentielle CCD - Systeme
- 5.6. Filterlos mit vollfarbigen Pixeln – Neueste Entwicklungen (2002)

6. Vergleich zwischen CCD und CMOS, Vorzüge, Nachteile, Probleme

7. Entwicklungsperspektiven beider Systeme

8. Stand der Technik im Alltag

9. Quellenverzeichnis

1. Einleitung

Die Entwicklung von hochauflösenden Bildaufnahmegegeräten stellt ein neues Zeitalter der Bildaufnahme dar und könnte alte Aufzeichnungsverfahren wie herkömmliche Filme sowie Fotos ablösen. Diese neuen Geräte basieren im Grunde auf zwei Technologien:

- a) *CCD (Charged Coupled Devices = Ladungsgekoppeltes Bauelement)* bzw.
- b) *CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor = Transistoren, die paarweise komplementär zueinander angeordnet sind).*

Ungeachtet der technischen und optischen Vollkommenheit klassischer Fototechnik in Form von qualitativ hochwertigen Kameras mit faszinierenden technischen Parametern stellen die hochauflösenden digitalen Bildaufnahmegegeräte bereits heute eine ernstzunehmende Konkurrenz dar.

Die Anfänge dieser Technologien stammen aus den 60er und 70er Jahren. CMOS – Sensoren waren damals jedoch zu langsam und ihre Herstellung bereitete Schwierigkeiten. Deshalb verwendete man bis 1990 fast ausschließlich CCD Chips. Die CMOS - als auch CCD – Technologie basieren auf dem *Lichtelektrischen Effekt*. Dieser Effekt beinhaltet, dass Licht auf ein Material trifft und Elektronen anregt. Das Wort CMOS bezieht sich dabei auf die Art, wie der Sensor hergestellt wird und stellt deshalb keine spezielle Aufnahmetechnik dar. CCD hingegen beschreibt das der Kamera zugrunde liegende Funktionsprinzip.

Die *Fotodiode* ist bei beiden Technologien das Schlüsselement des *Bildsensors*, der oft als *Pixel* bezeichnet wird. Im Folgenden sollen die beiden Verfahren, CCD und CMOS, vorgestellt werden. Daran anschließend werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede vorgestellt. Später soll auf aktuelle wichtige Probleme und ihre Lösungsansätze hingewiesen werden.

einige momentan erhältliche Digitalkameras



Abb. 1.1.



Abb. 1.2.

2. Physikalische und technische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten Grundprinzipien, auf die sich die digitale Fotografie stützt, kurz erläutert werden.

2.1. Der Fotoeffekt

Bestrahlt man eine elektrisch negativ geladene und auf einem Elektroskop angebrachte Zinkplatte mit Licht einer Quecksilberdampf Lampe, so geht der Ausschlag des Elektroskops sofort zurück, weil die Ladungen abfließen. Eine positiv aufgeladene Platte verliert ihre

Ladungen hingegen nicht. Das auftreffende Licht muss den Elektronen soviel Energie zugeführt haben, dass sie aus dem Metall austreten können. Man unterscheidet den **äußeren** vom **inneren Fotoeffekt**. Beim äußeren Fotoeffekt treten die Elektronen aus dem Material aus, beim inneren Fotoeffekt werden Elektronen lediglich aus dem Molekülverband gelöst, bleiben aber als freie Elektronen im Inneren des Materials. Der innere Fotoeffekt ist für die Halbleiterindustrie der interessantere Fall, weil hier die Elektronen vom **Valenzband** eines Atoms ins **Leitungsband** gebracht werden. (Man bezeichnet die Energieniveaus von Elektronen oft auch als Bänder.)

Die Eigenschaften der durch den Fotoeffekt erzeugten **Ladungen** sind von einer ganzen Reihe von Bedingungen abhängig. Wenn sichtbares und infrarotes Licht von 400 bis 1100 nm mit einem Siliziumatom innerhalb eines Substrates einer CCD kollidiert, springen Elektronen aufgrund einer Reaktion zwischen den Photonen und den Valenzelektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband. Eine Reihe von Faktoren bestimmt nun den Betrag der elektrischen Ladung, den das **Lichtquant** dabei erzeugt. Zu den Hauptfaktoren zählen: der **Absorptionskoeffizient**, die Neukombinationslebenszeit des Photons, der Diffusionsweg sowie die chemische und physikalische Struktur des Materials der oberen CCD-Schicht. Der Absorptionskoeffizient ist wellenlängenabhängig, d.h. große Wellenlängen (über 800 nm) dringen tiefer in das Silizium ein als kleinere.

In den Fällen, bei denen die Photonenenergie größer ist als die Energiedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband, wird ein Elektron mit hoher Wahrscheinlichkeit ins Leitungsband hinüberwechseln und damit frei sein. Das Elektron hinterlässt im Atom einen positiv geladenen Leerraum, ein so genanntes **Loch**. Liegt die (wellenlängenabhängige) Energie des Photons unterhalb eines bestimmten Wertes (Wellenlänge > 1100 nm), so kann es kein Elektronen – Loch – Paar erzeugen und durchdringt das Material völlig.

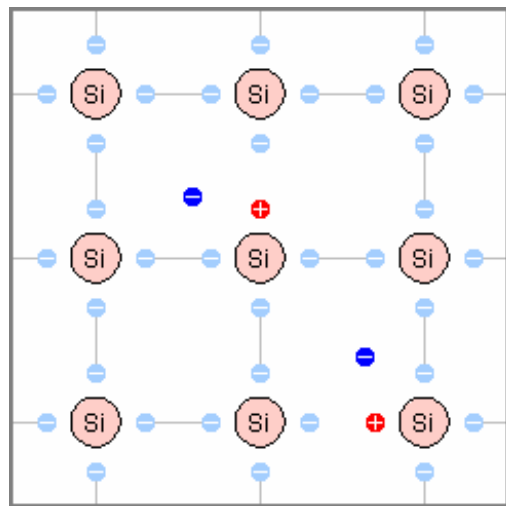


Abb. 2.1.

2.2. Der Feldeffekttransistor (MOS)

Feldeffekttransistoren beruhen auf dem Volumeneffekt. Die Leitfähigkeit in einem bestimmten Volumen, dem Kanal, wird von der Spannung an einer isolierten angebrachten Steuerelektrode (Gate) beeinflusst. Der Strom durch den von zwei Elektroden (Source und Drain) begrenzten Kanal ist nichtlinear von der Spannung über dem Kanal U_{DS} und der Spannung an der Steuerelektrode (*Gate*) U_{GS} abhängig.

Source und Drain werden gegenüber dem *Substrat (Bulk)* durch p-n-Übergänge separiert. Die p-n-Übergänge werden in Sperrichtung betrieben.

Aufbau des n-Kanal-Transistors als Anreicherungstransistor (Abb.2.2.):

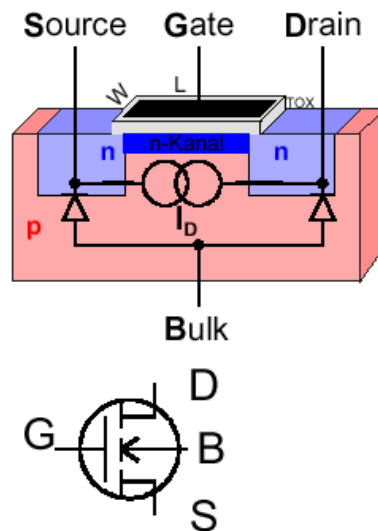


Abb. 2.2.

Es bildet sich erst dann ein leitfähiger Kanal im p-Gebiet der Gateelektrode, wenn eine ausreichend hohe positive Spannung beim Gate anliegt (*Schwelspannung*).

Es gibt auch noch *p-Kanal-Verarmungs-* als auch *Anreicherungstransistoren*.

*p – Kanal-
transistor*

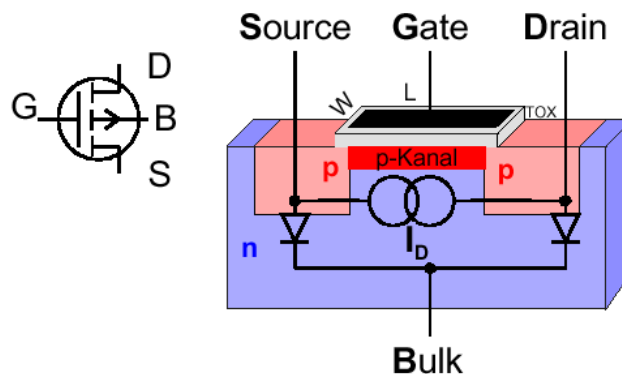


Abb. 2.3.

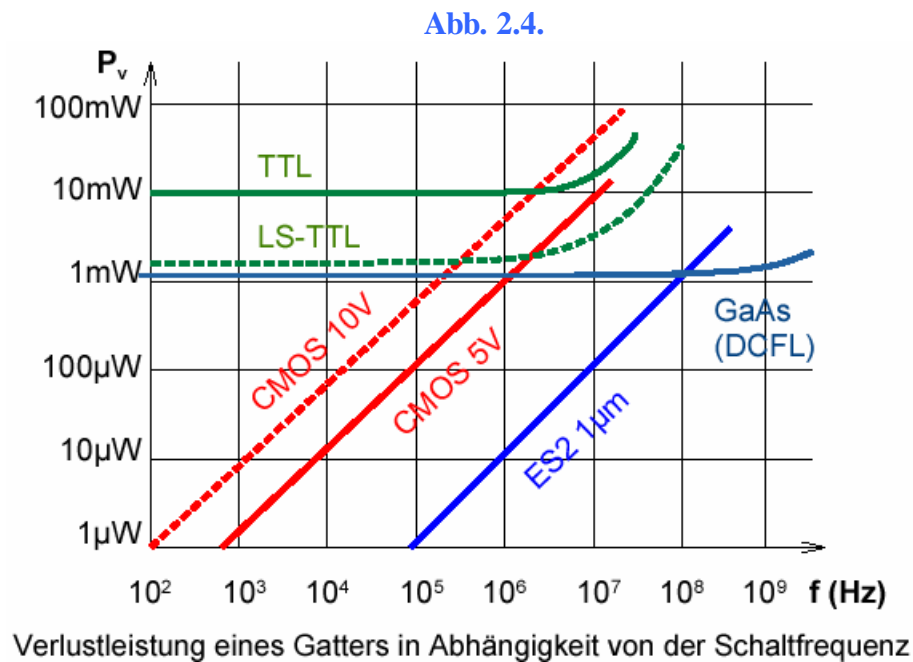
2.3. Das CMOS - Prinzip

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor
bedeutet übersetzt: zwei miteinander verschaltete komplementäre Feldeffekttransistoren.

Das Prinzip beruht auf einer Kombination von p-Kanal und n-Kanal-Feldeffekttransistoren. Dabei führt eine bestimmte Steuerspannung immer einen der zwei komplementären **Transistoren** in den *sperrenden*, den anderen in den *leitenden Zustand*.

Schaltet man beide Transistoren in Reihe, so fließt unabhängig von der Steuerspannung **kein Strom** von der Versorgungsspannung zum Bezugspunkt. Lediglich im Umschaltmoment fließt kurzzeitig ein Strom.

Die Stromaufnahme (Verlustleistung) ist demzufolge von der Umschalthäufigkeit abhängig. Hohe **Außentemperaturen** führen auch zu einer gewissen unerwünschten **Eigenleitfähigkeit** des Transistors.



In allgemeiner Weise kann man das CMOS – Prinzip beschreiben als eine sehr energiesparende Möglichkeit, logische Schaltungen zu realisieren.

Schaltungsbeispiel - CMOS - Negator

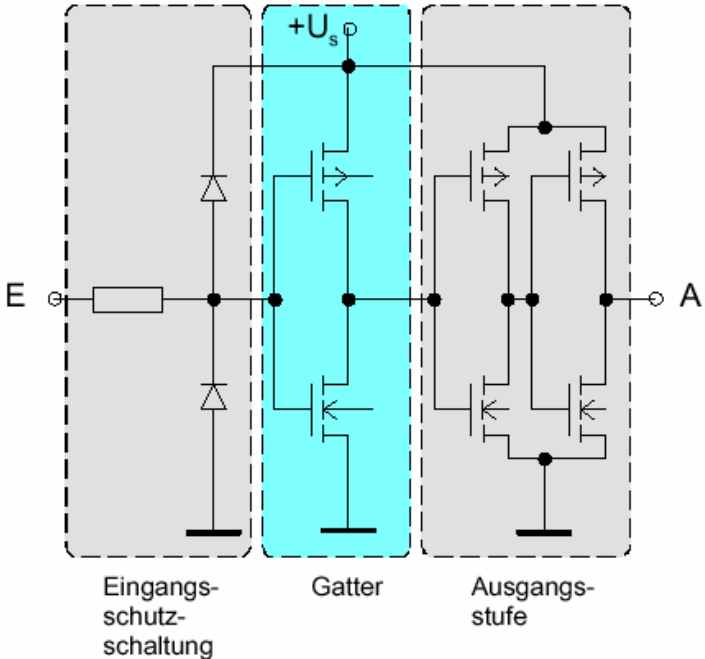


Abb. 2.5.

2.4. Zu einigen Wechselwirkungen von Photonen mit Silizium

Trifft Licht (Photonen) auf den *Feldeffekttransistor (MOS)*, so hängt primär von der Wellenlänge ab, ob das Photon vom Material reflektiert, absorbiert oder hindurchgelassen wird. Wellenlängen unter 400 nm werden an der Polysiliziumschicht (rot) reflektiert. Wellenlängen über 700 nm durchdringen den Transistor, ohne elektrische Ladungen zu erzeugen. Wellenlängen, die dazwischen liegen, lösen je nach Wellenlänge unterschiedlich hohe Ladungen aus. Die Stärke des Lichteinfalls bestimmt die Quantität der Ladungen. Negative Ladungen sammeln sich im *Ladungspool (Charge Well)*, positive Ladungen werden durch bestimmte Taktungsfolgen über die Gates abtransportiert. Umso niedriger die Gatesspannung ist, umso größer ist der Verarmungsbereich und umso besser kann der Strom durch den Transistor fließen. Photonen verschiedener Wellenlängen dringen unterschiedlich tief in den Transistor ein.

Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor

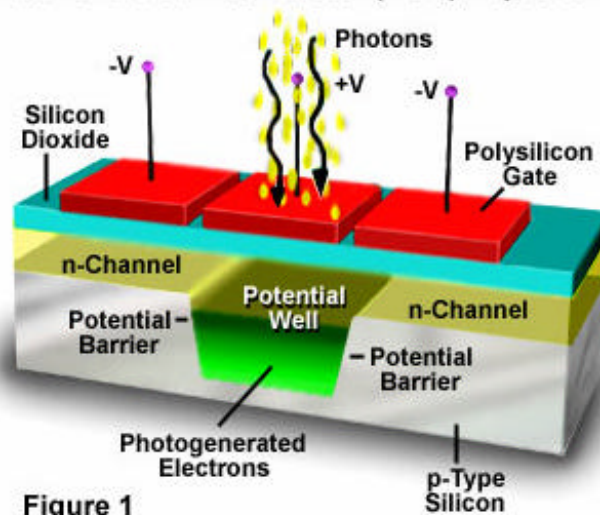


Figure 1

Abb. 2.6.

Die folgende Tabelle zeigt, welche Tiefe 90% aller Photonen bestimmter Wellenlänge durchdringen.

Photonenabsorptionstiefe

Wellenlänge (Nanometer)	Durchdringungstiefe (Mikronen)
400	0.19
450	1.0
500	2.3
550	3.3
600	5.0
650	7.6
700	8.5
750	16
800	23
850	46
900	62
950	150
1000	470
1050	1500
1100	7600

Abb. 2.7.

Die meisten CCD - Felder, die für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden, sind von einer geschützten Hülle aus Polysilizium überzogen, um Störungen aus der Umwelt sowie Feuchtigkeit zu vermeiden und die Lebensdauer der Kamera zu erhöhen. Eintreffende Photonen müssen oft durch eine Glas- oder Quarzscheibe, um das Pixelfeld und das Siliziumsubstrat zu erreichen. Reflexionsverluste an der Scheibe treten bei allen Wellenlängen auf. Die Durchlässigkeit für Wellenlängen unterhalb von 400 nm verringert sich stark bei Glasscheiben, weniger bei Quarzscheiben. CCD-Sensoren, die in der Wissenschaft Anwendung finden, sollen innerhalb großer Bereiche eine hohe Lichtempfindlichkeit bereitstellen und werden deshalb oft mit Quarzglas ausgerüstet.

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.

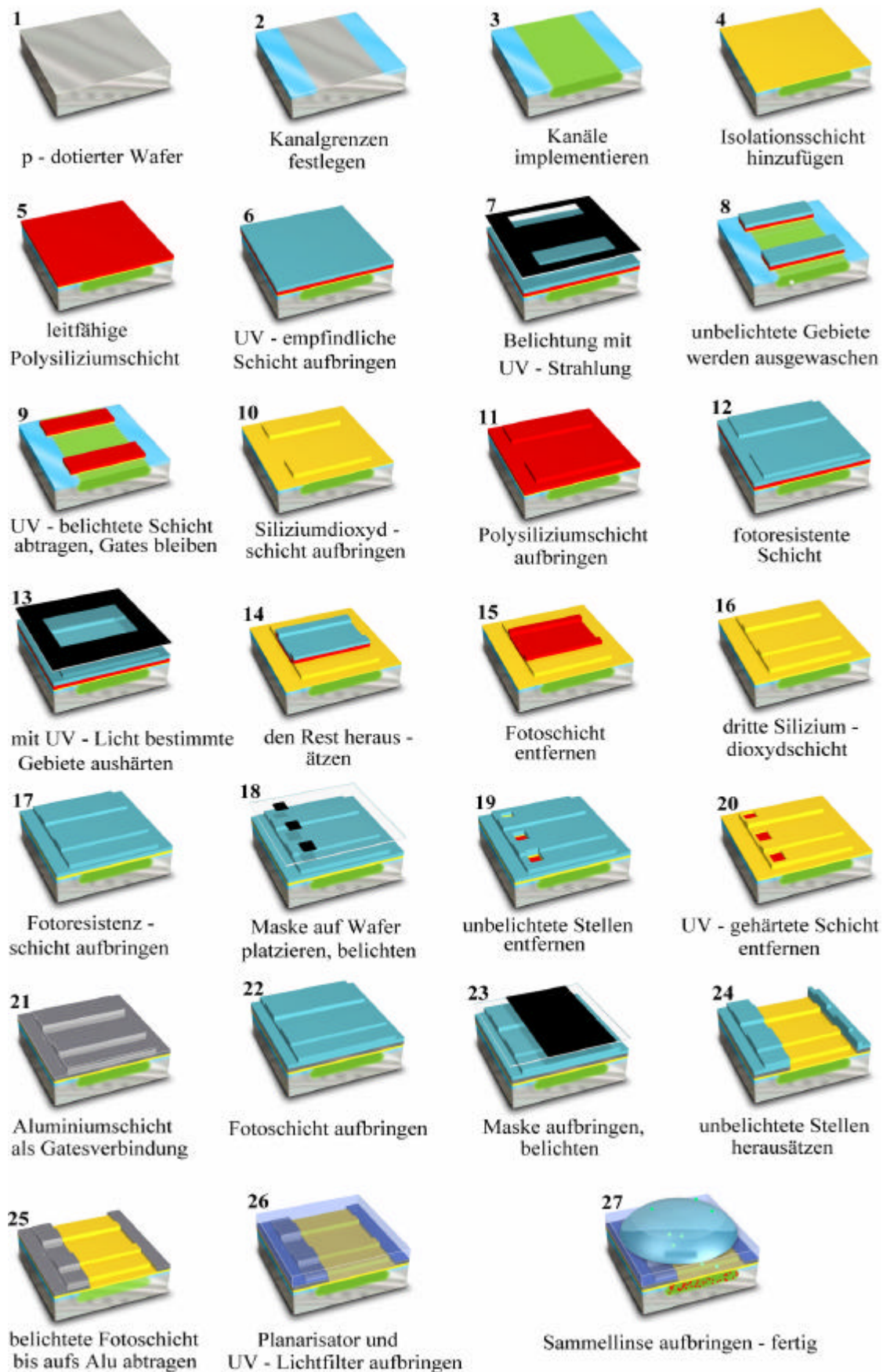


Abb. 3.1 Herstellungsschritte einer CCD - Fotodiode

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.

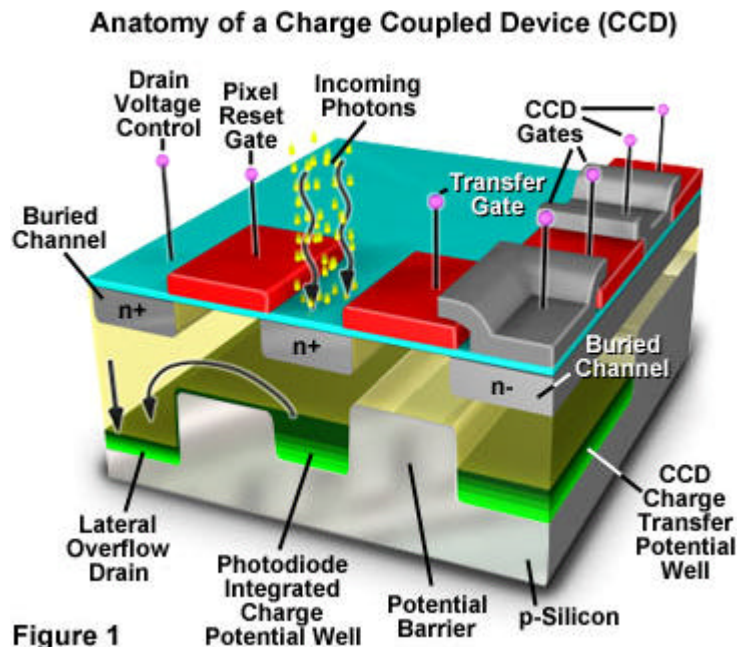


Abb. 3.2.

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 wegbewegt. 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.

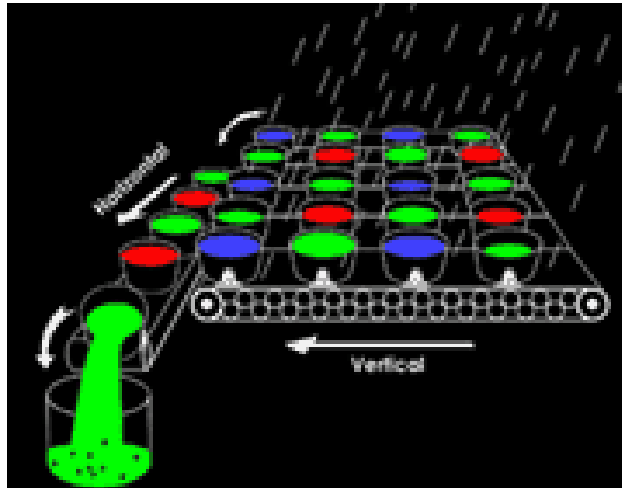


Abb. 3.3.

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.

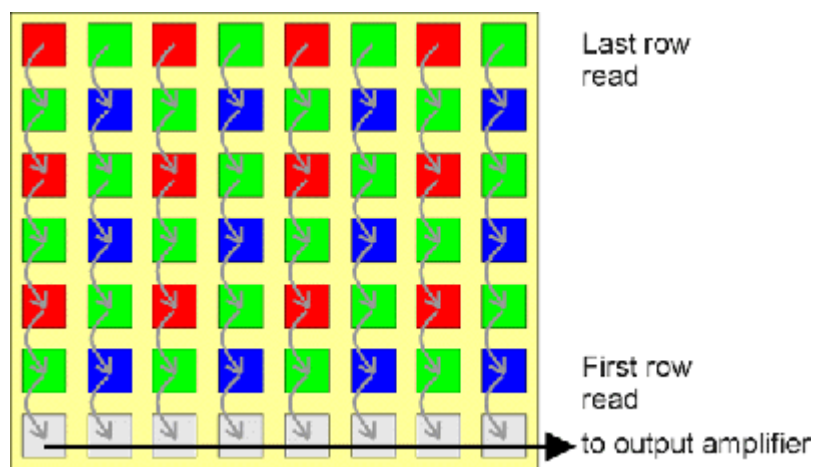


Abb. 3.4.

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.

4. CMOS – Gegensätzliche verschaltete Transistoren

4.1 Kurzer historischer Abriss

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

4.2. Aufbau eines CMOS – Sensors

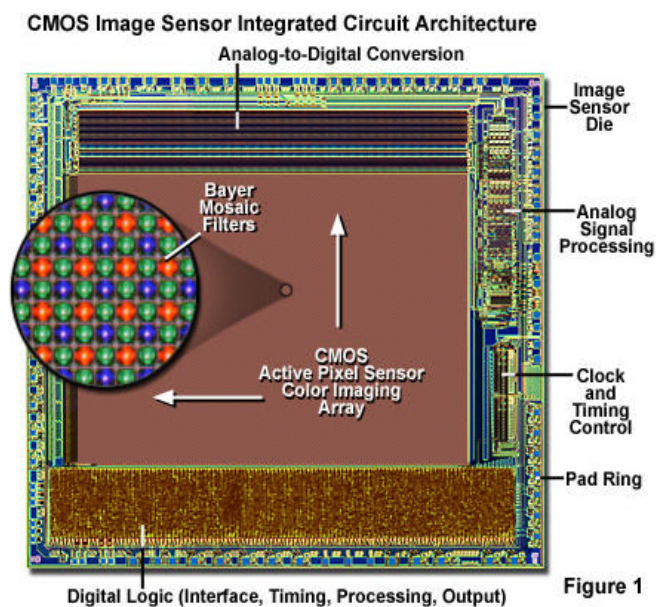


Abb. 4.1.

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

Die bekanntesten CMOS – Architekturen basieren auf „Aktiven Pixel Sensoren“ (APS) – Technologien, bei denen sowohl die Fotodiode als auch die Ausselelektronik 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

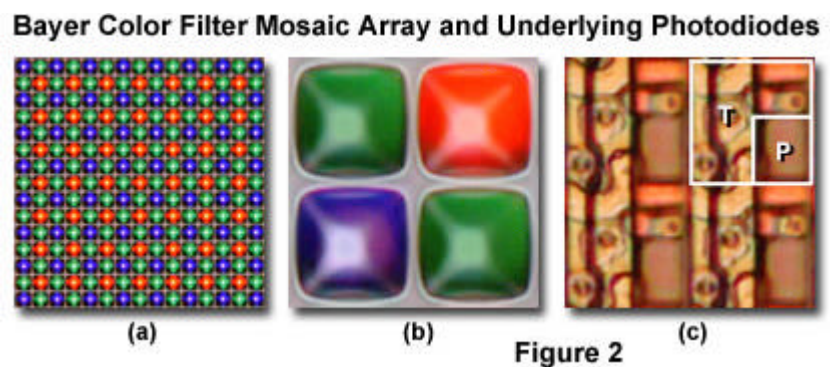
neugestartet und die Spannung auf den vertikalen Spaltenbus übertragen. Das daraus resultierende Feld ist mit einem organisierten Schachbrett mit metallischen Auslesebussen vergleichbar, das an jeder Kreuzung eine Fotodiode mit Signalverarbeitungselektronik enthält. Der Bus leitet die Leseanfrage an 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.

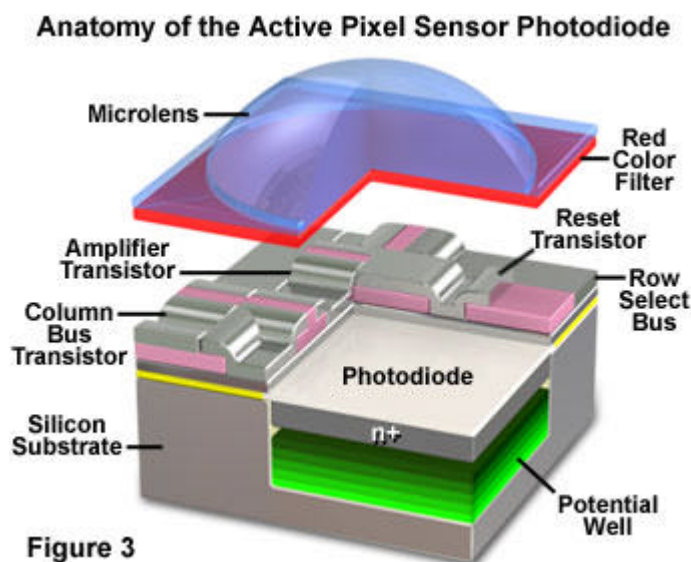
Die verschiedenen Farbfilter rot, grün und blau (Abb. 4.2.b) auf den Fotodioden haben die Aufgabe, einzelne Farbkomponenten des eintreffenden Bildes zu erfassen. Wie man sieht, gibt es doppelt so viele grüne Pixel wie rote bzw. blaue, was u. a. damit zusammenhängt, dass das menschliche Auge für grünes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

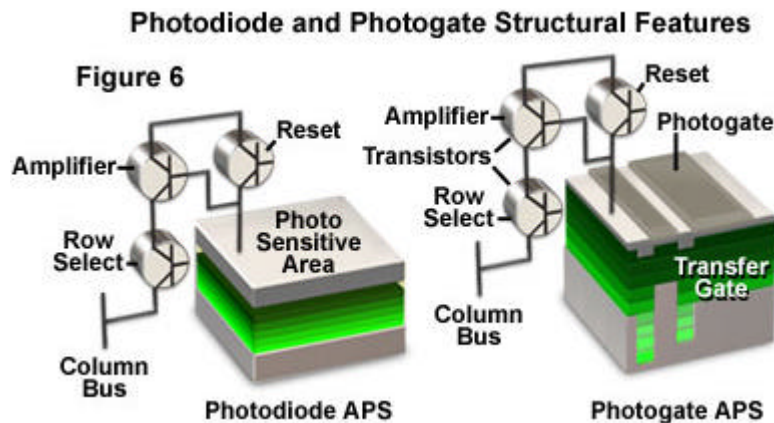


eine APS Fotodiode

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 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.

4.3. 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.

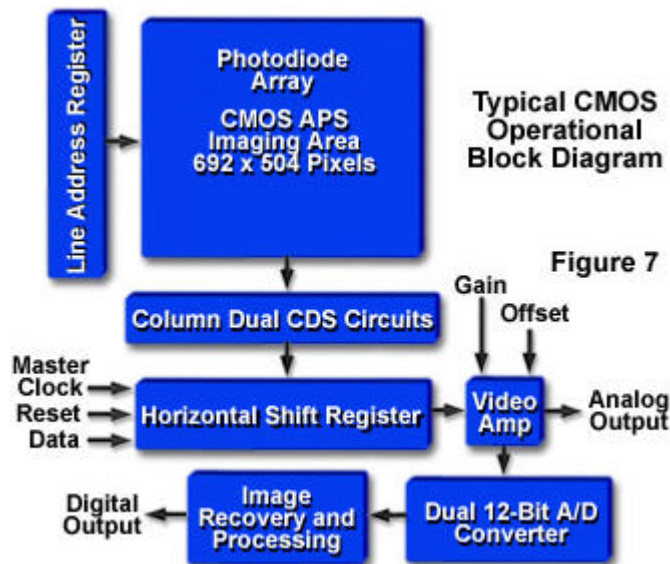


Abb. 4.4.

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

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

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

Bildfrequenzen von 30 bis 60 fps ^{*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.

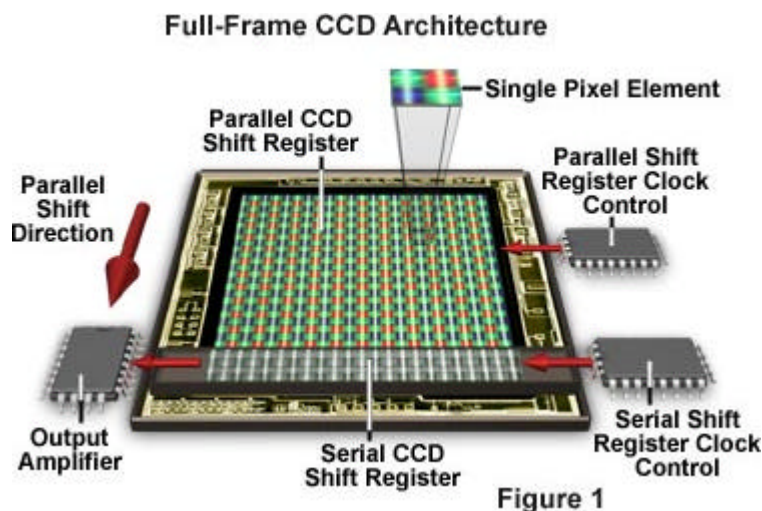
²⁾ fps steht für „frames per second“ und bedeutet sinngemäß übersetzt „Bilder pro Sekunde“

5. Wesentliche Konzepte für die digitale Bilderfassung im Zusammenhang mit der CCD - Technik

5.1. Aufnahme und Speicherung von Bildern - Full-Frame, Frame-Transfer, Interline-Transfer

5.1.1. Full-Frame-CCD-Architektur

Full-Frame CCDs besitzen sehr dichte Pixelfelder, die in der Lage sind, Bilder mit der zurzeit höchsten Auflösung bereitzustellen. Diese populäre CCD – Architektur ist sehr weit verbreitet, nicht zuletzt wegen ihres einfachen Aufbaus, ihrer Zuverlässigkeit und Einfachheit in der Herstellung.



Bedeutsam ist, dass das Pixelfeld hierbei keine Blindbereiche hat. Die Fotodioden decken die Fläche, auf die während der Belichtungsphase das Licht trifft, vollständig ab. Das vergrößerte Bild (in Abb. 5.1) stellt eine Mikroskopaufnahme von Pixeln einer solchen CCD-Kamera da. Der Auslesevorgang verläuft zunächst wieder zeilenweise parallel und dann seriell. Der große Vorteil dieser Kamera ist ihre hundertprozentige Lichtausbeute. Full-Frame-CCDs besitzen oft Auflösungen aus Zweierpotenzen (512×512 oder 1024×1024), um Speicher- und Bildverarbeitungsoperationen zu vereinfachen. Sie haben meist quadratische Dimensionen, um Verzerrungen des Bildes zu vermeiden und besitzen bis zu 6 Megapixel mit einer Pixelgröße von 7 bis 24 Mikronen. Weil das Pixelfeld sowohl für die Belichtung als auch für das Auslesen verwendet wird, benötigt man einen mechanischen Verschluss oder eine andere Art von Synchronisation, um Schmiereffekte beim Fotografieren zu vermeiden. Schmier- oder Wischeffekte entstehen immer dann, wenn Fotodioden kontinuierlich und somit auch während des Auslesevorgangs belichtet werden. Die Schmierstreifen zeigen in die Richtung, in welcher der parallele Lesevorgang stattfindet. Bei Geräten, die über lange Auslesezeiten verfügen, kann der Effekt sehr bedenklich werden. Die Auslesegeschwindigkeit ist nach oben durch die Bandbreite des Ausgangsverstärkers sowie die Geschwindigkeit des Analog-Digital-Konverters begrenzt. Sie kann jedoch deutlich erhöht werden, wenn das Bild in kleinere gleichgroße Unterbilder eingeteilt wird, die dann simultan ausgelesen werden. Ein Videoprozessor setzt das Bild später wieder zusammen.

Sowohl Vorder- und Rückseitenbelichtungen (Kapitel 5.4) wurden mit Full-Frame CCDs umgesetzt. Bei der rückseitigen Belichtung werden eintreffende Photonen mit höherer Effektivität in elektrische Ladungen umgewandelt als bei der frontseitigen, weil das von

hinten kommende Licht nicht das Gate durchqueren muss, das die lichtempfindlichen Fotodioden abdeckt. In letzter Zeit wurden neue CCD – Technologien vorgestellt, die Indiumzinnoxid für die Herstellung von lichtempfindlicheren Gates benutzen, um somit die Quanteneffektivität des Lichts zu erhöhen und die Rückseitenbelichtung überflüssig zu machen.

Der Nachteil von Full-Frame-Kameras ist, dass sie keinen Videostrom von Bildern bereitstellen können, sondern nur einzelne zeitverzögerte Bilder, weil der Verschluss immer wieder schließen muss. Neuere Kameras projizieren jedoch das aktuelle Objekt als Video auf den Sucher, wo für andere Technologien mit einem Zwischenspeicher notwendig sind, die in den nächsten Kapiteln beschrieben werden.

5.1.2 Frame-Transfer-CCD - Architektur

Die Architektur von Frame-Transfer CCDs ist der von Full-Frame CCDs ähnlich. Frame-Transfer-Geräte verfügen jedoch über ein Parallelschieberegister, das in zwei gleichgroße Gebiete eingeteilt ist. Diese Gebiete nennt man Bildfeld bzw. Speicherfeld (Image Array bzw. Storage Array).

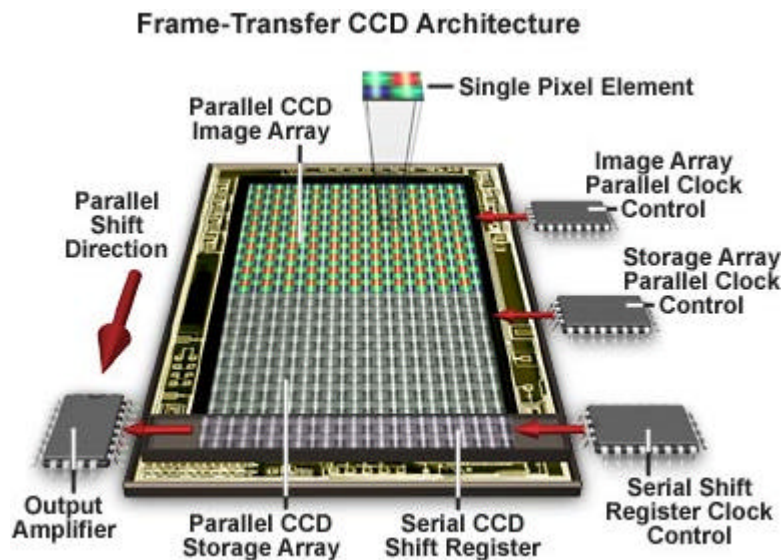


Figure 1

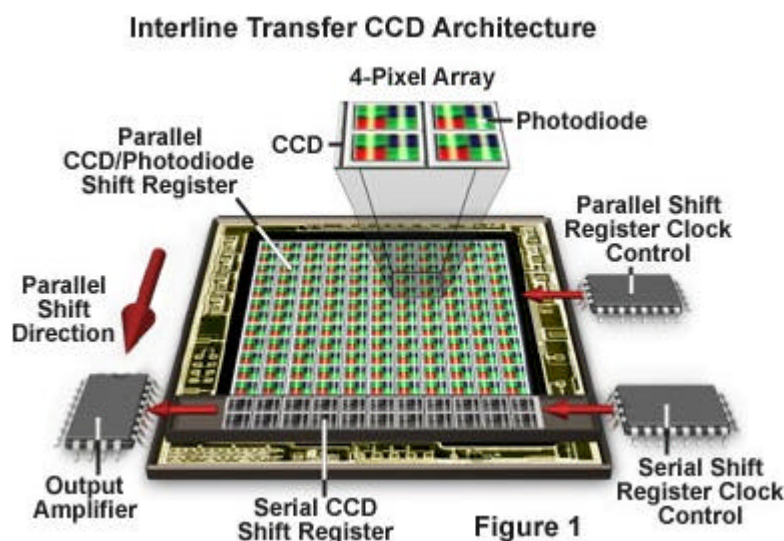
Abb. 5.2.

Das Bildfeld besteht aus einem lichtempfindlichen Fotodiodenregister, das als Bildebene dient und die eintreffenden Photonen auf der CCD-Oberfläche sammelt. Nachdem die Bilddaten gesammelt und in elektrische Ladungen gewandelt wurden, werden die Ladungen sofort ins Speicherfeld geschoben, um dort vom seriellen Schieberegister ausgelesen zu werden. Die Transferzeit vom Bild- zum Speicherfeld ist von der Bildfeldgröße abhängig. Das Speicherfeld ist bei den meisten CCDs nicht lichtempfindlich, obwohl einige Geräte nicht mit einem integrierten Lichtschutz ausgestattet sind. Felder dieser Art können entweder im Full-Frame- oder im Frame-Transfer-Modus arbeiten. Durch die Anwendung von mechanischen Verschlüssen kann eine Frame-Transfer-CCD benutzt werden, um in kürzester Zeit nacheinander zwei Bilder aufzuzeichnen; ein sinnvolles Merkmal, das in der Fluoreszenz-Mikroskopie ab und an verwendet wird.

Wie in Abb. 5.2. erkennbar, ist das graue Speicherfeld von einer Metallabschirmung abgedeckt, um Interaktionen mit den eintreffenden Photonen zu vermeiden. Der Auslesevorgang erfolgt identisch zu dem bei Full-Frame-CCDs. Während das Speicherfeld ausgelesen wird, sammelt das Bildfeld neue Photonen für das nächste Bild. Der große Vorteil dieser Architektur ist die Fähigkeit, ohne Verschluss oder Synchronisationen auszukommen. Das führt zu einer Erhöhung der Gerätegeschwindigkeit und zu einer erhöhten Bildrate. Man kann den aktuellen Bildausschnitt als Videostrom auf einem kleinen Monitor, der an der Rückseite der Kamera angebracht ist, darstellen. Frame-Transfer-CCDs haben jedoch mit Problemen wie Bildschmiereffekten, die daher rühren, dass sich Aufnahme und Speicherung zugleich vollziehen, zu kämpfen. Schmiereffekte sind auf die Zeit begrenzt, die die Kamera benötigt, um das alte Bild ins Speicherfeld zu schieben. Geräte dieser Art sind außerdem teuer, weil die doppelte Menge an Silizium zur Herstellung benötigt wird. Das hat eine geringere Bildqualität oder höhere Kosten zur Folge.

5.1.3. Interline-Transfer-CCD Architektur

Die Interline-Architektur soll viele Probleme der Frame-Transfer-CCDs beheben. Diese Geräte bestehen aus einer Mischstruktur verschiedener Fotodioden und einer angeschlossenen CCD-Region mit einem Parallelauslesespeicher für jeden Pixel. Die Funktionen dieser zwei Regionen sind durch Metallmasken vor eintreffenden Lichtstrahlen geschützt.



Diese maskierten Bereiche werden neben den Fotodioden platziert, sodass immer eine Spalte von Fotodioden mit einer Spalte von Speicherzellen abwechselt. Die Fotodioden nehmen nun wieder Licht auf und sammeln es. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, wird das Bild mit hoher Geschwindigkeit in die Speicherfelder geschrieben. Dort wird es wie bei den vorhergehenden Verfahren ausgelesen. Im weiteren Verlauf rekonstruiert man es digital. Während der Parallelspeicher gelesen wird, sammeln auch hier die Fotozellen wieder Photonen des nächsten Bildes. Ein Verschluss oder ein Synchronisator wird auch hier nicht benötigt. Die Schmiereffekte sind sehr gering, weil der Bildtransfer sehr schnell vonstatten geht (ca. eine Mikrosekunde). Zu bemängeln sind auch hier die hohen Produktionskosten und die sehr geringe Pixelapertur. Der Füllfaktor kann mit Mikrolinsen von 20-25% auf über 75% verbessert werden.

Bei Interline CCDs treten zudem wegen der geringen Apertur Abtastfehler auf. Einige Kameras hatten in der Vergangenheit auch mit zurückbleibenden Ladungen zu kämpfen, die erst mit dem nächsten Bild ausgelesen wurden. Neuere Geräte konnten diese Fehler aber beheben.

5.2. Überbelichtung bei CCDs – Blooming

Werden CCDs einer großen Menge Licht ausgesetzt, ist es möglich, dass die Speicherkapazität der Ladungspools überschritten wird; ein Effekt, der auch unter dem Namen „Blooming“ bekannt wurde. Dabei gelangen überschüssige Ladungen zu angrenzenden Fotodioden und verursachen innerhalb eines bestimmten Bereiches um den überbelichteten Pixel herum ein fehlerhaftes, weil zu helles Bild.

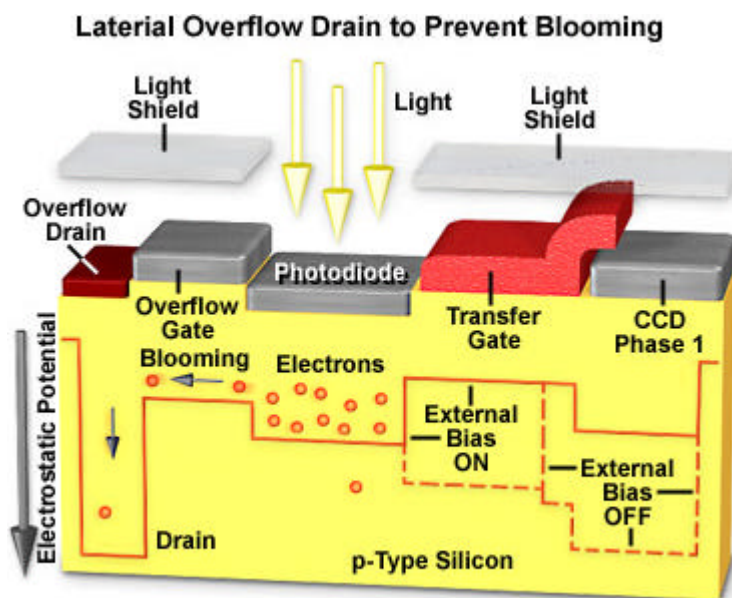


Figure 1

Abb. 5.3.

Fotodiode, die mit Drains (Abflussleitungen) Bloomingeffekte verhindert

Die Kapazität des Ladungspools eines Pixels wird durch seine Größe determiniert. Die Zahl der entstehenden Elektronen steht in linearem Zusammenhang zum einfallenden Licht. Wenn sich der Ladungspool seinem Sättigungslimit nähert (wenn er mit Elektronen gefüllt ist), bricht dieser lineare Zusammenhang zusammen. Die Reaktion des Pixels auf zusätzliches Licht sinkt infolgedessen und bleibt schließlich nahezu aus. Der Punkt, an dem die **Reaktivität** auf einfallendes Licht nicht mehr linear ist, wird auch als „Linear Full Well“ bezeichnet und hat einen großen Anteil an der Dynamik einer CCD.

Wenn ein Ladungspool gesättigt ist, springen Ladungen auf andere Pixel über, die dadurch auch gesättigt werden und hohe Helligkeiten signalisieren. Wenn das gesamte Bildfeld gesättigt wird, oft im Falle lang anhaltender intensiver Strahlung, kann auch der Ausgangsknoten gesättigt werden. Das führt meist zum Zusammenbruch des gesamten Systems. Blooming ist erkennbar an weißen Streifen, die alle Details des Bildes ausbleichen.

Oft kann Blooming aber reduziert werden, indem man die Ladezeiten der Pixel verkürzt. Dies führt jedoch nur teilweise zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Außerdem wurden Mechanismen entwickelt, um Blooming zu verhindern. Es werden *waagerechte* und *senkrechte* Abflussleitungen, sogenannte *Drains* (Vertical Overflow Drain/Lateral Overflow Drain) implementiert. Diese können überschüssige Ladungen vom Chip weggleiten.

Eine weitere Ursache für Bloomingeffekte ist die Tatsache, dass ein Pixel mehr Ladungen speichern kann als er weiterzuleiten in der Lage ist. *Pixel Reset Gates* blenden zurückgebliebene Ladungen aus.

Der Nachteil besteht darin, dass diese Leitungen auf dem Chip die Lichtempfindlichkeit einschränken, weil sie die Pixelgrößen begrenzen.

5.3. 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 Informationsverluste möglichst gering zu halten.

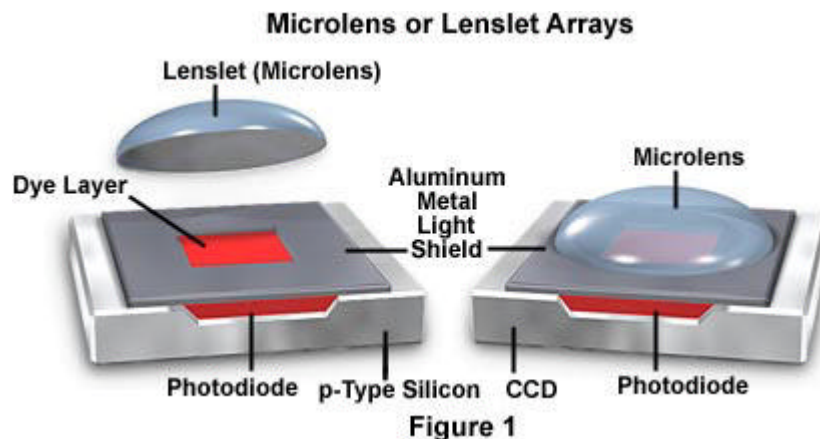


Abb. 5.4.

Die Abb. 5.4. zeigt ein typisches Pixel-Linsenkonstrukt. Die Linse wird genau über den Farbfilm 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.

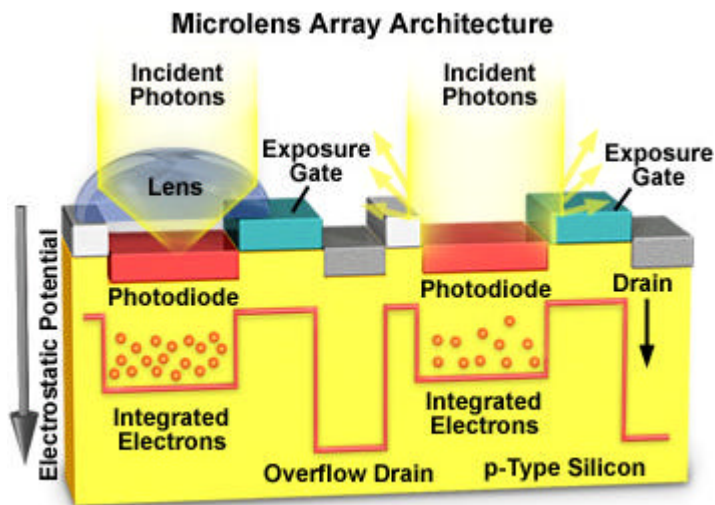


Figure 2

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.

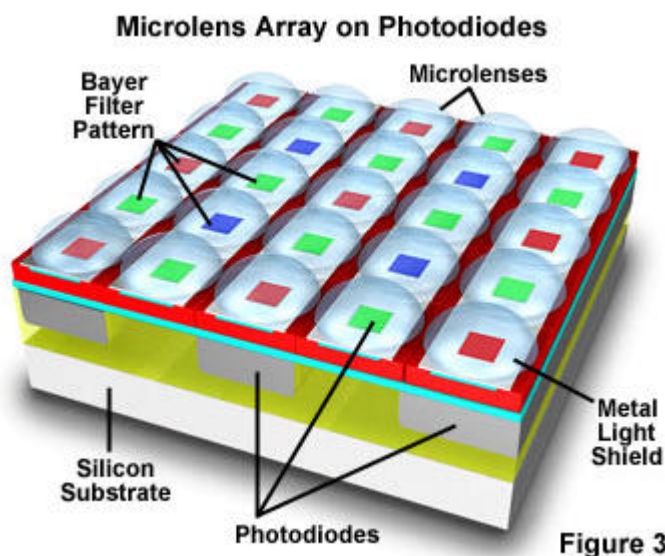


Figure 3

ein Linsenfeld

Abb. 5.6.

5.4. Verbesserung der Quanteneffektivität von CCDs – Frontside- und Backside - Illumination

Die Quanteneffektivität einer CCD beschreibt die fotovoltaische Reaktionen, die als die Anzahl der neu entstehenden Elektronen - Loch - Paare für jedes eintreffende Photon definiert ist. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig für Anwendungen, die in Bereichen mit wenig Licht zum Einsatz kommen sollen (Fluoreszenzmikroskopie).

Standard – CCDs, die die Photonen auf der Vorderseite durch die Gateelektrode und die darunterliegenden Schichten (Siliziumdioxid) eintreffen lassen, sind im grünen und roten Bereich (550 bis 900 nm) empfindlich, im blauen jedoch weniger.

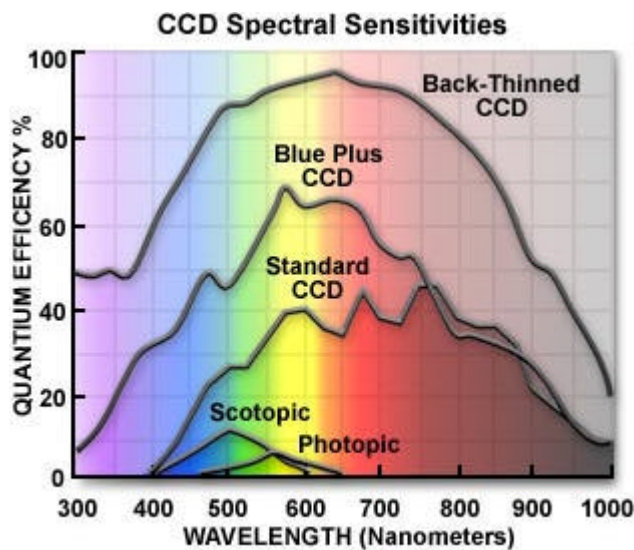


Figure 1

Abb. 5.7.

Die spektrale Empfindlichkeit eines CCD – Sensors unterscheidet sich von der einer einfachen Fotodiode dadurch, dass noch gewisse Layer aus Polysilizium auf der Vorderseite der CCD aufgebracht sind. Diese Strukturen, sind dazu da sind, die Ladungen zu transportieren und die CCD vor Feuchtigkeit und elektrostatischer Entladung zu schützen. Weiterhin absorbieren diese Schichten genau die Wellenlängen, die kürzer als 450 nm sind und verringern somit die Blauempfindlichkeit des Gerätes. Die Durchlässigkeit von Polysilizium wird für Wellenlängen unterhalb von 600 nm immer geringer. Für Photonen mit 400 nm Wellenlänge ist das Material undurchdringlich, wobei die Absorption zusätzlich von der Gatedicke und den Lichtinterferenzeffekten abhängt. Interline-Transfer-CCDs haben aufgrund ihrer Fotodiodenstruktur (kein Polysiliziumgate) kaum Probleme mit Interferenzeffekten.

Die Quanteneffektivität ist auch von der Gatesspannung abhängig. Eine niedrige Spannung erhöht die Verarmungsgebiete im Transistor und umgekehrt. Traditionelle Filme sind im Gegensatz zu CCDs sehr empfindlich im Blaubereich, was oft zu deutlichen Unterschieden zwischen Bildern führt, die einerseits auf herkömmliche Art und andererseits mit einer CCD aufgenommen wurden.

Kleiner werdende Pixeldimensionen verstärken diese Unterschiede zunehmend, weil die Blauempfindlichkeit für kleinere Pixel rapide abnimmt.

Eine typische Spektralempfindlichkeitskurve für Standard-CCDs ist im oberen Bild 5.7. dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass die höchste Empfindlichkeit markant unter der einer Silizium-Fotodiode liegt. Unebenheiten in den Diagrammkurven sind auf Interferenzeffekte auf der CCD-Oberfläche zurückzuführen. In den letzten Jahren wurde die Transparenz der Übertragungskanäle speziell im Blau-Grün-Bereich stark verbessert, gerade für wissenschaftliche CCDs (Blue Plus – Kurve). Erreicht wurde dies durch neue Materialien und phosphorisierende Schichten. Solche Schichten werden direkt auf die Oberfläche aufgetragen und emittieren Licht im Bereich von 500 bis 580 nm, wenn auf sie hochenergetisches bzw. sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von 120 bis 450 nm trifft. Die Phosphorschichten rufen außerdem noch eine Fluoreszenz hervor, die in alle Richtungen gleichmäßig verteilt wird. Sie sind durchlässig für größere Wellenlängen, wodurch man eine Aufnahmebreite von ca. 1000 nm zur Verfügung hat (120 bis 1100 nm).

Abbildung 5.7. zeigt als Ergänzung zum Vergleich auch die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges für das photonische und scotopische Sehen (Zapfen- und Stäbchensehen). Das Zapfensehen ist im grünen Bereich am ausgeprägtesten (555 nm), das Stäbchensehen ähnlich (507 nm). Die Quanteneffektivität beträgt hierbei maximal 3% für das Zapfensehen und 10% für das Stäbchensehen. Aus dieser Sicht hat eine CCD - Kamera ein viel breiteres Spektrum und eine höhere Quanteneffektivität als das menschliche Auge.

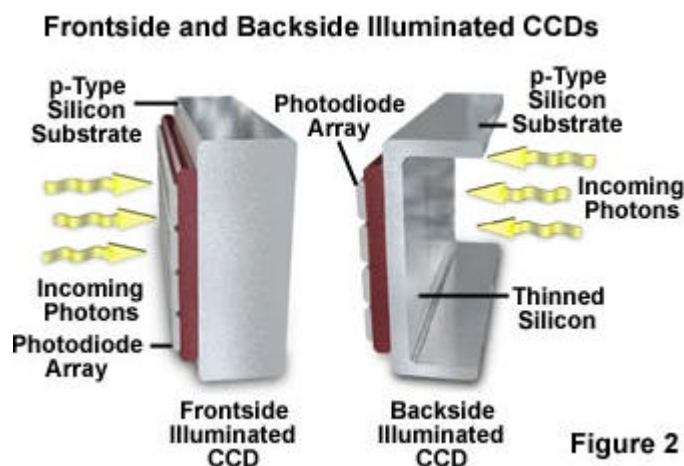


Figure 2 **Abb. 5.8.**

Die Verluste, die durch Gate – Kanalstrukturen entstehen, werden beim Belichten von der Rückseite des CCD-Chips komplett annulliert. Hierbei fällt Licht auf die Rückseite der CCD in eine Region, die durch Ausätzen so dünn gemacht wurde, dass sie durchsichtig ist (Dicke von ca. 10 – 15 Mikronen). Die daraus resultierende spektrale Empfindlichkeitskurve (siehe Back-Thinned und Back-Illuminated CCD Abb. 5.7. und 5.9.) zeigt die hohe Quanteneffektivität, die damit erreicht werden kann. Dieses Design ist aber sehr teuer. Deshalb ist es bisher nur in High-End-Wissenschaftskameras zum Einsatz gekommen.

Antireflexionsschichten werden in den Backthinned CCDs benutzt, um die Quanteneffektivität zu erhöhen. Es ist aber noch nicht möglich, Schichten zu produzieren, die die Reaktivität für den gesamten Spektralbereich verstärken, insbesondere für die langen Wellenlängen. Schichten, die die Reaktivität für kurze Wellenlängen erhöhen, verringern sie oft im selben Atemzug für die langen Wellenlängen. Für die Forschung besteht deshalb eine vorrangige Aufgabe darin, eine Schicht zu entwickeln, die die Reaktivität im gesamten Spektralbereich erhöhen kann.

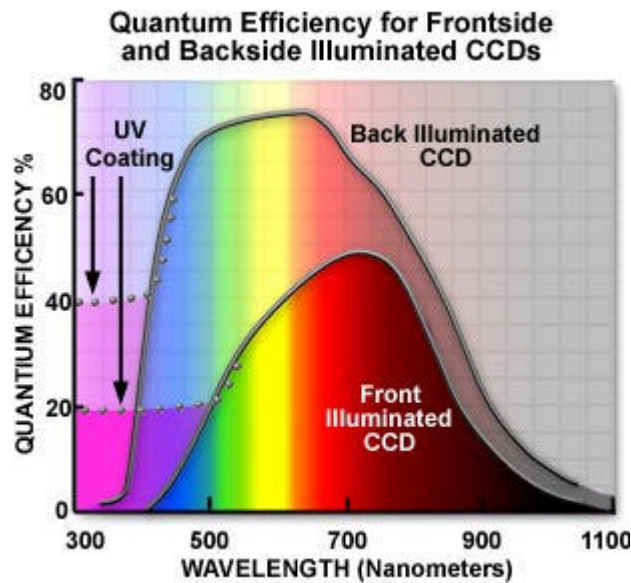


Figure 3

Abb. 5.9.

5.5. Farbkanalseparierende sequentielle CCD - Systeme

Ein großer Nachteil von herkömmlichen CCD-Kameras ist die Tatsache, dass die gesamte Chipfläche mosaikförmig auf die drei Farbanteile aufgeteilt werden muss. Dies hat Moiréeffekte, geringe Auflösungen und eine geringe Lichtempfindlichkeit zur Folge. Die folgende Realisation versucht nun, diese Probleme durch die sequentielle Erfassung der einzelnen Farbkanäle zu lösen.

Drei-Pass-Sequenz-Farb-CCD-Kameras benutzen ein rotierendes Rad das mit drei Farbfiltern ausgestattet ist. Rotiert das Rad, so werden abwechselnd jeweils der rote, der grüne bzw. der blaue Kanal des aktuellen Bildes herausgefiltert, um drei aufeinander folgende Bilder mit den drei RGB Farbanteilen (rot, grün und blau) zu erfassen. Der Hauptvorteil dieser Technik besteht in der Möglichkeit, das gesamte Pixelfeld der CCD für jede einzelne Farbe benutzen zu können, dadurch können Moiréeffekte gar nicht erst entstehen.

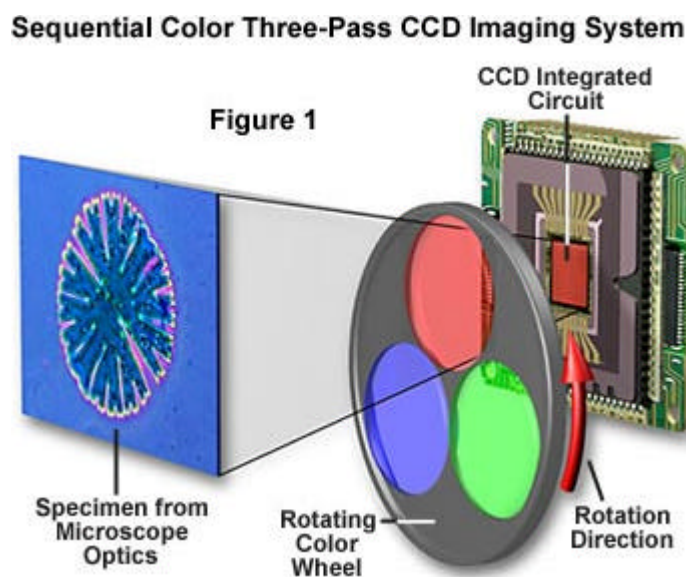


Abb. 5.10.

Siliziumbasierte 1-Chip-CCDs besitzen keine Möglichkeit, die Farbinformation eines Photons ohne Farbfilter zu unterscheiden. Obwohl elektromagnetische Strahlung von unterschiedlicher Wellenlänge das Silizium unterschiedlich stark durchdringt, ist die Interaktion, die freie Elektronen und Löcher generiert, nicht dazu geeignet, die Farbinformation aus der Ladung zu entnehmen.

Ein typisches Sequenz-Farbbildsystem-Design ist in Abb. 5.10 dargestellt. Hier wird gezeigt, wie Licht durch den Rotfilter zur CCD-Oberfläche dringt. Der Vorteil besteht darin, dass man die maximale Auflösung des Chips für jede Farbe ausnutzt.

Nachdem die gesamte Bildinformation aufgenommen wurde, wird das Bild ähnlich wie bei anderen CCD-Architekturen außerhalb vom Chip wieder zusammengesetzt und Neuberechnet. Von Nachteil ist die relativ lange Belichtungszeit, die notwendig ist, um drei verschiedene Farbkanalbilder aufzuzeichnen. Man kann also nur feststehende Objekte damit erfassen, das Rotieren des Farbfilterrades muss außerdem möglichst vibrationsfrei verlaufen. Diese Drei-Pass-Sequenz-Farb-CCD-Technik wird langsam von konventionellen CCD-Kameras mit hohen Auflösungen abgelöst, bzw. von 3-Chip-CCDs (siehe nächstes Kapitel). Dennoch

wurden gerade jetzt Geräte mit ultraschnell wechselnden LCD-Filtern entwickelt. Die LCD-Schirme helfen, die drei Bilder in Millisekunden zu filtern, erhöhen somit den Datenstrom und eliminieren das Risiko mechanischer Vibrationen.

5.6. Filterlos mit vollfarbigen Pixeln – Neueste Entwicklungen (2002)

Um von den Mosaikformen gängiger Bildaufnehmer wegzukommen, wurde vor kurzem ein System für Digitalkameras entwickelt, das 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

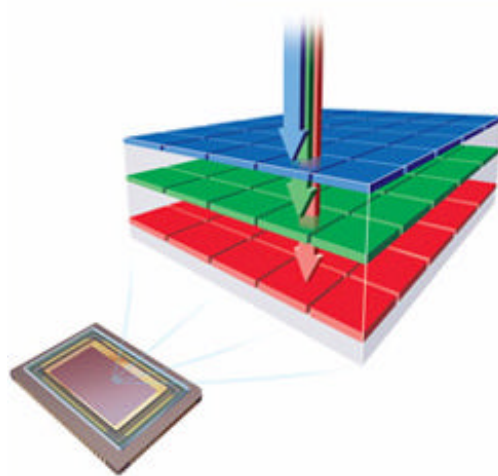


Abb. 5.11.

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.

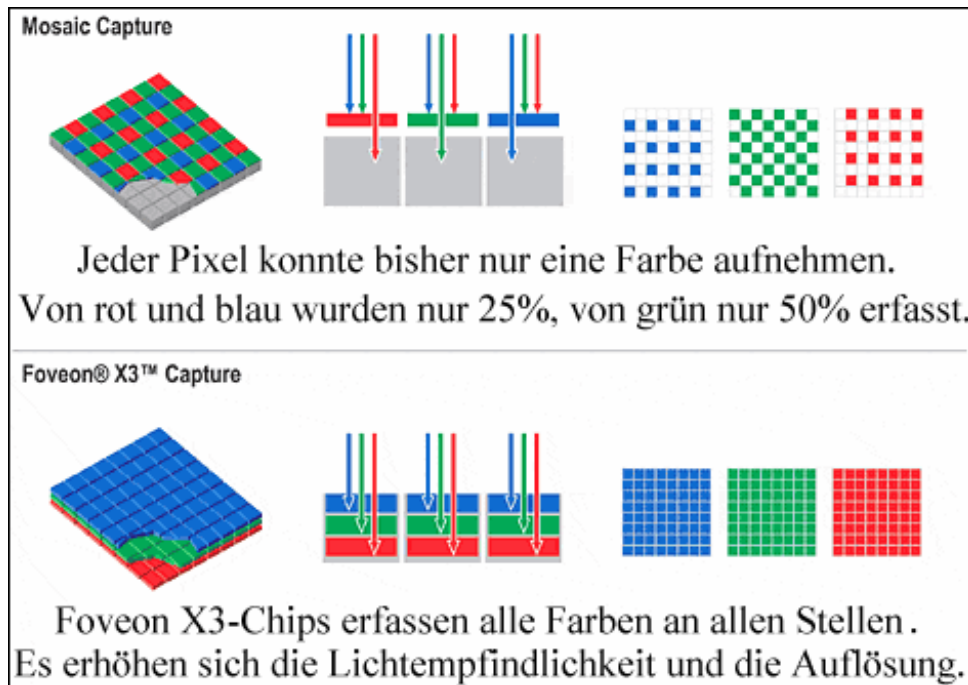


Abb. 5.12.

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.

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

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

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

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

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

Stärken von CCD - Kameras

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

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

Stärken von CMOS - Kameras

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

Schwächen von CCD - Kameras

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

Schwächen von CMOS - Kameras

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

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

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

6.1. Reaktivität

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

6.2. Dynamik

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

6.3 Uniformität

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

6.4. Verschluss

Ist die Möglichkeit, die Belichtung nach Belieben zu starten und zu stoppen. Dies ist ein Merkmal nahezu aller CCDs, speziell von Interline-Transfer-Systemen und besonders wichtig bei 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-, kapazitiven- und Weiterleitungsverzögerungen. Heute ist der Vorteil von CMOS-Systemen auf diesem Gebiet gegenüber CCDs in den Hintergrund gerückt, weil ein Großteil der Konsumenten nicht so hohe Bildwiederholraten wie die Industrie, die Wissenschaft und die Medizin benötigen.

6.6. Windowing

Eine einzigartige Fähigkeit von CMOS- Geräten ist die Möglichkeit, nur einen Teil des Bildes auszulesen. Diese Fähigkeit rührt daher, dass nur CMOS – Systeme die Bildpunkte einzeln adressieren können. Das erlaubt erhöhte Bild- und 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.

6.7. Antiblooming

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

6.7. Spannung und Taktung

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

6.8. Zuverlässigkeit

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

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.

6.9. 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

7. 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, sodass 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.

8. 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 inwieweit 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, indem 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.

³⁾ In folgenden Geschäften wurden Gespräche geführt:

1. Saturn Hellersdorf;
2. Vobis Eiche;
3. ProMarkt Eiche;
4. ProMarkt im Spreecenter

9. Quellenverzeichnis

Digitalkameras

www.canon.de

www.sony.de

Der Fotoeffekt

Abiturwissen Physik, Walter Jung, Weltbild Kolleg

http://smile.unibw-hamburg.de/HL_Physik/Undotierte_HL.htm

Feldeffekttransistoren und CMOS-Technologien:

Dr. Winkler, Technische Informatik 1, HU Berlin

CCD, CMOS, Aufbau

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/concepts.html>

http://www.dpreview.com/learn/Glossary/Camera_System/Sensor_01.htm

Neue Bilderfassungstechnologie - Foveon Chip

www.foveon.com

www.sigma-photo.com/Html/news/news_sd9_fs.htm

Vergleich CCD CMOS

<http://www.dalsa.com>