Kapitel 3

Hochgeschwindigkeitskamerasysteme mit Halbleiter-Bildsensoren auf CCD-Basis

Obwohl die bisher beschriebenen Systeme durch ständige Optimierung und Verbesserungen ein sehr bemerkenswertes technisches Niveau erreicht haben, stellen heutzutage Kameras mit Halbleiter-Bildsensoren den neuesten Stand der Technik nicht nur in der Standard-Videographie, sondern auch in der Hochgeschwindigkeits-Kinematographie für die meisten industriellen und wissenschaftlichen Anwendungen dar. Diese Systeme sind nicht nur funktionsmäßig und preislich, sondern auch wegen ihrer wesentlich geringeren Komplexität den zuvor genannten Systemen deutlich überlegen. Die kompakten Halbleiter-Lösungen konnten sehr erfolgreich komplizierte mechanische und auf Basis der Röhrentechnik basierende elektronische Bauteile für Hochgeschwindigkeitsanwendungen ersetzen. Außerdem sind die Halbleiter-Bildsensoren in die dafür speziell gefertigten Kamerasysteme eingebettet, die eine gute Kompatibilität zu den PC-Rechnern anbieten können. Dies setzt eine Digitalisierung der gewonnenen Daten in elektronischen Kamerasystemen voraus und ermöglicht eine Verwendung der konventionellen Speicherbausteine als Speichermedium für die akquirierten Bilddaten. Dadurch entfällt der Film als Speichermedium und die damit verknüpften Probleme bei der Aufnahme von Prozessen bei hoher Geschwindigkeit. Außerdem ist eine nachträgliche Verarbeitung der Signale möglich, die die Basis für industrielle und wissenschaftliche Bildverarbeitung ist.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Halbleiter-Bildsensoren ist zum einen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber der Röhrentechnik, wenngleich bei den kurzen Integrationszeiten für alle aufzunehmenden, nicht selbst leuchtenden Ereignisse (wie bei den vorher beschriebenen Systemen) eine zusätzliche künstliche Beleuchtung notwendig ist. Zum anderen zeichnet sich die integrierte Bildsensorik durch eine deutlich geringere Verlustleistung gegenüber den anderen Systemen aus.

Zur Zeit ist die Halbleiter-Bildsensorik geprägt durch Bildsensoren auf Basis der CCD-

Technologie ("charge-coupled devices"). Dies ist dadurch bedingt, daß man mit Hilfe der damals verfügbaren Lithographie nicht in der Lage war, ausreichend kleine Strukturen technologisch zu realisieren, um die ersten zweidimensionalen Bildsensorarrays unter Verwendung von MOS-Dioden rentabel zu verwirklichen [17]. Außerdem war die Bildqualität bei CCD-Bildsensoren zuerst wesentlich besser als bei Bildsensoren mit MOS-Dioden. So hat sich die CCD-Technologie mit MOS-Kondensatoren als Bildelemente für eine Photokonversion und Ladungsspeicherung bzw. mit einem Ladungstransfer zwischen den Bauelementen als ein Signalausleseprinzip durchgesetzt. Im Laufe der Jahre wurden aufgrund der ständigen Verbesserung dieser Sondertechnologie ihre zahlreichen Probleme gelöst, so daß die CCD-Bildsensoren heutzutage Martkführer in der integrierten Bildsensorik sind. So sind die integrierten Hochgeschwindigkeitssensoren bisher hauptsächlich in der CCD-Technologie realisiert worden. Andere bedeutsame integrierte Sensoren mit passiven Bildelementen wie z.B. CID-Sensoren ("charged injection devices") [18] oder MOS-TLS-Bildsensoren ("transversal signal line") [19] sind für High-Speed-Anwendungen aus der Literatur nicht bekannt.

Dieses Kapitel wird sich im Weiteren mit CCD-Bildsensoren für Hochgeschwindigkeitsanwendungen beschäftigen. Zuerst wird auf die Problematik dieser speziellen Technik inklusive aller ihrer Vor- und Nachteile bei der Akquisition der Bilder mit hoher Rate und kurzen Belichtungszeiten hingewiesen. Anschließend wird ein Überblick über die existierenden Sensoren gegeben.

3.1 Das Prinzip der CCD-Bildsensoren

Unabhängig davon, ob in den CCD-Bildsensoren für die photo-elektrische Konversion bzw. für die in den Raumladungszonen gebildeten Potentialwannen benötigte Ladungspeicherung MOS-Kondensatoren oder MOS-Dioden verwendet werden, liegt als Ausleseprinzip der akquirierten Bildinformation immer ein Ladungstransfer zugrunde. Ein Prinzip des Ladungstransfers der zuvor integrierten Photoladung ist in Abbildung 3.1 anhand von Querschnitten der MOS-Kondensatoren gezeigt. Unter dem Gate mit einer hohen Steuerspannung ist der große Potentialtopf aufgrund der Photokonversion mit Ladung gefüllt. Wenn an das nebenan liegende Gate eine gleich große Spannung angelegt wird, bildet sich unter diesem Gate ein gleich großer Potentialtopf, so daß sich die gesamte Ladung aufteilen kann. Wenn die Spannung an dem Gate, unter dem die Photokonversion stattgefunden hat, anschließend gesenkt wird, verteilt sich die Ladung (schrittweise gezeigt), so daß sie für die endgültige Steuerspannungskonstellation nur unter dem zweiten Gate bleibt. Damit ist ein Transfer der Ladung zwischen zwei Gates durchgeführt worden. Die detaillierten Erklärungen der Mechanismen der Photokonversion, der Ladungsspeicherung sowie des Ladungstransfers mittels Zwei-, Drei- oder Vier-Phasen-Taktes sind ausführlich in [20] beschrieben.

Bevor auf die Realisierungskonzepte der CCD-Bildsensoren näher eingegangen wird, wer-



Abbildung 3.1: Prinzip des Ladungstransfers bei einem CCD-Sensor.

den die wichtigsten Aspekte für die Hochgeschwindigkeitskinematographie diskutiert. Insbesondere werden die Probleme, die allgemein integrierte Sensoren bei diesen Anwendungen begleiten, anhand der CCD-Sensoren erklärt. Lösungen zur Beseitigung der typischen Probleme werden später im Zusammenhang mit bestimmten Sensorkonfigurationen vorgestellt.

Die Aufnahme von schnell ablaufenden Ereignissen erfordert eine kurze zeitliche Abtastung der Szene. Im Zusammenhang mit einer für bestimmte Anwendungen teilweise notwendigen hohen Auflösung resultiert hieraus eine sehr große Datenmenge, die verarbeitet werden muß. Dies wiederum erfordert einen hohen Systemtakt, mit dem die Pixelwerte ausgelesen werden. Damit bei entsprechend hoher Pixelrate die Daten ausgelesen werden können, muß die Bandbreite der verwendeten Ausleseelektronik (bzw. der Ausgangsstufe) ausreichend groß gewählt werden. Aufgrund der daraus folgenden großen Rauschbandbreite steht dies aber im Gegensatz zum guten Rauschverhalten des Sensors. Außerdem ist eine schnelle Ausgangsstufe mit einer höheren Verlustleistung des Sensors verknüpft. Bei den Hochgeschwindigkeits-CCD-Sensoren wird das Problem im allgemeinen dadurch entschärft, daß der Sensor selbst in mehrere Auslesebereiche unterteilt wird, womit sich die gesamte Pixelrate als ein Vielfaches der niedrigeren Pixelrate der einzelnen Kanäle ergibt. Als Folge der mehrkanaligen Sensorstruktur vergrößert sich die Komplexität des Kamerasystems um die externe Elektronik zur Ansteuerung und Auslese des Sensors. Bei den realisierten CCD-High-Speed-Kameras sind abhängig von der Auflösung der CCD-Sensoren bis zu sechzehn Kanäle üblich [21]. Dabei verfügen CCD-Sensoren in der Regel über eine Architektur mit aufgeteiltem Speicherbereich ("split frame storage"), so daß eine Hälfte des Bildes nach oben bzw. die andere nach unten ausgelesen wird. Trotz der parallelen Auslese erfordert diese Architektur immer noch hohe Pixelraten und demzufolge ist eine sehr sorgfältige Rauschanalyse der Ausgangsstufe nötig, um das gesamte Rauschen zu optimieren.

Dem Problem der hohen Pixelraten stehen die Schwierigkeiten bei den Bildaufnahmen bei sehr kurzen Belichtungszeiten im gleichen Maße gegenüber. Die Belichtungsdauer muß ausreichend kurz sein, um eine Unterabtastung der Szene zu vermeiden, was zu unscharf aufgenommenen Objekten führen würde¹. Gleichzeitig muß auch dafür gesorgt werden, daß alle Pixel innerhalb der photoempfindlichen Matrix genau gleich lang belichtet werden. Zur Realisierung der hierzu notwendigen synchronen Shutterfunktion gibt es, wie später detaliert gezeigt wird, verschiedene qualitativ unterschiedliche On- oder Off-Chip Ansätze.

Um bei kurzen Belichtungszeiten mit Hilfe einer möglichst geringen zusätzlichen Beleuchtung ausreichend hohe Nutzsignale zu akquirieren, muß die Empfindlichkeit des Sensors ausreichend groß sein, bzw. muß das Rauschen klein gehalten werden. Die Empfindlichkeit des Photosensors ist ein Maß dafür, wieviel Photostrom bei einem bestimmten Strahlungsfluß generiert wird. Dabei kann der Photostrom eines CCD-Sensors für eine definierte Bestrahlungsstärke bei einer bestimmten Wellenlänge λ in Form der photogenerierten Signalladung als

$$Q_{photo} = I_{photo} T_{int} = S_{\lambda} A_D E T_{int}$$
(3.1)

ausgedrückt werden. Hieraus folgt

$$\frac{dQ_{photo}}{dE} = S_{\lambda} A_D T_{int}.$$
(3.2)

Die photogenerierte Signalladung ist direkt proportional zu der Belichtungsdauer T_{int} , der Bestrahlungsstärke E, der optisch wirksamen Fläche A_D und der spektralen Empfindlichkeit S_{λ} des Halbleiter-Bildsensors. Für eine zur Verfügung stehende Bestrahlungsstärke ist bei einer festgelegten Belichtungszeit T_{int} die generierte Signalladung nur durch die optisch wirksame Fläche A_D und die spektrale Empfindlichkeit S_{λ} zu beeinflussen. Die spektrale Empfindlichkeit S_{λ} , die eine Empfänglichkeit jedes integrierten Sensors bei einer bestimmten Wellenlänge beschreibt, kann als das Verhältnis des erzeugten Photostroms I_{photo} zu dem einfallenden Strahlungsfluß Φ_0 ($\Phi_0 = E A_D[W]$) gemäß Gleichung (3.3) definiert werden:

$$S_{\lambda} = \frac{I_{photo}}{\Phi_0} = \eta \frac{e \lambda}{h c} = 8, 1 \cdot 10^5 \cdot \eta \lambda \left[\frac{A}{W}\right]$$
(3.3)

wobei die Größen e die Elementare Ladung, h die Plank'sche Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit sowie η den Quantenwirkungsgrad und λ die Wellenlänge des Lichtes darstellen. Der

¹In englischsprachiger Literatur ist dies als "blur" bekannt.

Quantenwirkungsgrad η beschreibt das Verhältnis der Anzahl der zum Photostrom beitragenden Ladungsträgerpaare zu der gesamten Anzahl aller auf der optisch wirksamen Fläche einfallenden Photonen und hängt von den Absorptionskoeffizienten bzw. dem Kehrwert der Eindringtiefe sowie dem Reflexionsfaktor des jeweiligen Materials ab [22].

Für 2D-Anwendungen ist angesichts einer aus Kostengründen möglichst klein zu wählenden gesamten Chipfläche die optisch wirksame Fläche A_D aufgrund der zwangsläufig kleinflächigen Pixel ebenso kleiner. Deswegen ist man bemüht, einen hohen Füll-Faktor (das Verhältnis zwischen der photoempfindlichen und der gesamten Pixelfläche) im Pixel zu erzielen. Neben dem hohen Füll-Faktor ist es für eine höhere Empfindlichkeit daher ebenso notwendig, den Quantenwirkungsgrad durch technologische Maßnahmen zu beeinflussen [23].

Das Rauschen als eine andere wichtige Größe für kurze Belichtungszeiten bestimmt den Signal-Rausch-Abstand (SNR), der als das Verhältnis der Anzahl der Signalelektronen zur Anzahl der Rauschelektronen definiert ist. Die gesamte Rauschbilanz des CCD-Sensors umfaßt drei große Rauschgruppen, die verschiedene Ursachen haben. Dabei handelt es sich zum einen um das Photonenrauschen, das poissonverteilt ist, und dessen Elektronenzahl somit der Wurzel der Anzahl der Signalelektronen entspricht [13]

$$n_{rausch} = \sqrt{n_{sig}}.$$
(3.4)

Zu der zweiten Gruppe gehören die Rauschelektronen n_{CCD} , die während des Ladungstransfers innerhalb der CCD-Kanäle entstehen und auf Inhomogenitäten der Dunkelstromgeneration, den unvollkommenen Ladungstransfer, Unregelmäßigkeiten in den Kristallstrukturen ("trapping centers"), die Inhomogenität der gleichen Strukturen innerhalb der Pixel und Pixel- oder Spaltenausfällen aufgrund von Prozeßfehlern zurückzuführen sind.

Die letzte Gruppe beschreibt das Rauschen der Ausgangsstufe mit der Rauschelektronenzahl n_{out} und schließt das thermische Rauschen, das 1/f-Rauschen und das Resetrauschen ein. Wenn die Gleichung (3.3) in (3.1) eingesetzt wird, kann die Anzahl der Signalelektronen n_{sig} als

$$n_{sig} = \eta \, \frac{\lambda}{h \, c} A_D \, E \, T_{int} = \frac{E}{h \, \nu} A_D \, T_{int} \, \eta \tag{3.5}$$

beschrieben werden. Man erkennt, daß die Anzahl der Signalelektronen der Anzahl der pro Fläche einfallenden Photonen $\frac{E}{h\nu}$, der optisch wirksamen Fläche A_D , der Belichtungsdauer T_{int} und dem Quantenwirkungsgrad η direkt proportional ist. Aufgrund ihrer nicht korrelierten Natur setzt sich die gesamte Varianz des ausgangsseitigen Rauschens aus der Summe der Varianzen der einzelnen Beiträge zusammen: Photonenrauschen, Rauschen in den CCD-Kanälen und Rauschen der Ausgangsstufe. Daraus ergibt sich der Signal-Rausch-Abstand (SNR) als

$$SNR = \frac{\frac{E}{h\nu} A_D T_{int} \eta}{\sqrt{\frac{E}{h\nu} A_D T_{int} \eta + n_{CCD}^2 + n_{out}^2}}$$
(3.6)

Bei einem gut optimierten CCD-Sensor sind die Rauschanteile in den CCD-Kanälen und in der Ausgangsstufe möglichst klein zu halten. Das führt dazu, daß bei den hohen Bestrahlungsstärken das Photonenrauschen dominant wird und der Signal-Rausch-Abstand bei einer konstanten Bestrahlungsstärke E und festgelegter Belichtungsdauer nur von der Wurzel der optisch wirksamen Fläche A_D und der Wurzel des Quantenwirkungsgrads η abhängt. Für den Fall einer maximalen auflösbaren Bestrahlungsstärke wird der Dynamikbereich (DR) als das Verhältnis zwischen der maximalen Anzahl der Signalelektronen und der Anazahl der Rauschelektronen, die vom Rauschen der CCD-Kanäle n_{ccd} und der Ausgangsstufe n_{out} bestimmt ist, definiert.

Für eine Rauschminimierung gelten für 2D-Anwendungen die gleichen Überlegungen wie bei der Empfindlichkeitsoptimierung, d.h. für eine festgelegte Belichtungsdauer T_{int} ist neben einem hohen Füll-Faktor auch ein hoher Quantenwirkungsgrad η wünschenswert. Zusätzlich muß das Rauschen in den CCD-Kanälen sowie in der Ausgangsstufe sorgfältig analysiert und minimiert werden. Die Grundlagen zum oben beschriebenen Rauschen in CCD-Sensoren mit Maßnahmen zur Rauschunterdrückung sind in [24] dargestellt. Auf die in dieser Arbeit relevanten Rauschmodelle und -mechanismen in der CMOS-Technik wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

Bevor ein Überblick über die realisierten CCD-Sensoren gegeben wird, werden noch einige Probleme geschildert, die bei Hochgeschwindigkeitsbildaufnahmen von großer Bedeutung sind.

Basierend auf der Natur der verwendeten Bildelemente kommt es bei einem hell strahlenden Objekt in den Pixeln zum Ladungsüberschuß, weil die Potentialwannen der Bildelemente die generierte Ladung nicht mehr abspeichern können. Damit wird die Signalinformation der benachbarten Pixel verfälscht, was als eine lokale Überstrahlung der Szene um den hellen Objektbereich erkennbar ist. Dieser Effekt der Überstrahlung ist in der Literatur als "Blooming" bekannt. Da es aufgrund der teilweise erforderlichen starken Ausleuchtung der Szene oder in selbst-leuchtenden Szenen bei der Bildaufnahme zur Verstärkung des erwähnten Effekts kommt, ist der Anti-Blooming-Mechanismus von größter Bedeutung bei allen Hochgeschwindigkeitssensoren.

Ein weiteres Problem, das bei CCD-Sensoren sowie bei jedem anderen integrierten Sensor auftritt, ist eine Verfälschung der Signalinformation während der Auslese der Signale. Dieser Effekt, bekannt als Nachzieheffekt ("Smearing"), wird bei einer Übersteuerung der Spalten bzw. bei Spaltenausfall sichtbar, wenn die aufzunehmende Szene über ein Objekt mit einer großen Helligkeitsinformation verfügt. Da sich bei diesem Effekt das unerwünschte Licht zur Bildinformation in der Zeit vor und nach abgeschlossener Integration aufaddiert, muß dafür gesorgt werden, daß die Transportzeit, in der das parasitäre Licht die Information beeinträchtigt, klein gegenüber der Integrationszeit ist. Um allerdings die hohen Bildraten und kurzen Integrationszeiten zu erreichen, kann die Integrationszeit nicht größer als die Zeit sein, die für die Auslese des Sensors benötigt wird. Aufgrund des zusätzlich erforderlichen Reset-Mechanismus ist sie in der Regel eine Größenordnung kleiner als die Bilddauer. Im Einzelnen hängt das von der gewählten Sensorarchitektur ab.

Über Maßnahmen zur Unterdrückung aller oben gennanten Effekte werden anhand der verschiedenen CCD-Bildsensorkonfigurationen in den nächsten Unterkapiteln diskutiert. Außerdem wird ein Überblick über die realisierten High-Speed-Sensoren und -Kameras gegeben.

3.2 Die CCD-Bildsensoren für hohe Bildraten

Die unterschiedlichen CCD-Bildsensorkonfigurationen sind hauptsächlich durch verschiedene Transferarchitekturen geprägt. Dem Ladungstransferprinzip zugrunde liegend sind sie in drei große Gruppen unterteilt worden: Frame-Transfer CCD-Sensoren (FT-CCDs), Interline-Transfer CCD-Sensoren (IT-CCDs) und Frame-Interline-Transfer CCD-Sensoren (FIT-CCDs) [25]. Basierend auf den aufgezählten Konfigurationen verdient eine kleine modifizierte Gruppe, die sog. Burst-Modus CCD-Sensoren, ebenso die Aufmerksamkeit für die angestrebte Anwendung.

Im folgenden werden diese Konfigurationen vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile bei Anwendungen mit hohen Bildraten und kurzen Integrationszeiten diskutiert.

3.2.1 Frame-Transfer CCD-Sensoren

FT-CCDs bestehen aus zwei getrennten großen Bereichen: einem Bildaufnahmebereich (einer photoempfindlichen Matrix) und einem lichtgeschützten Speicherbereich (siehe Abbildung 3.2). Die photoempfindliche Matrix hat daher einen Füll-Faktor von nahezu 100%, da fast die gesamte Fläche der Pixel zur Photokonversion verwendet wird. Die nach einer bestimmten Integrationszeit gewonnene Bildinformation wird vollständig in den Speicherbereich transferiert. Anschließend werden die gespeicherten Daten zeilenweise zu den horizontalen Registern bzw. Ausgangsverstärkern weitergegeben. Erst dann erfolgt die Akquisition eines neuen Bildes.

Verglichen mit den anderen Konfigurationen benötigen FT-CCDs die einfacheren Prozeßschritte bei der Herstellung. Dies ist direkt mit ihrer vergleichsweise einfachen Struktur verknüpft, die auch eine hohe Transfergeschwindigkeit ermöglicht. Außerdem stellt der 100%-ige



Abbildung 3.2: Die verschiedenen CCD-Typen: FT-CCD, IL-CCD, FIT-CCD (von links nach rechts).

Füll-Faktor einen weiteren Vorteil dieser Konfiguration dar, aufgrund der daraus folgenden höheren Empfindlichkeit, sowie eine Verminderung der örtlichen Alias-Problematik. Die aufgezählten Vorteile dieser Konfiguration sind mit einer größeren Chipfläche zu bezahlen. Für die Hochgeschwindigkeitsanwendung sind außerdem die Güte der Unterdrückung des Bloomings und der Nachzieheffekte ebenso von sehr großer Bedeutung.

Der Blooming-Effekt entsteht bei FT-CCD-Sensoren nach der abgeschlossenen Integration während des Ladungstransfers vom Bild- in den Speicherbereich. Um diesen Effekt bei FT-CCDs zu verhindern, gibt es verschiedene Maßnahmen unter denen die wichtigsten horizontales Antiblooming und vertikales Antiblooming sind [20]. Das horizontale Antiblooming erfordert zusätzliche Strukturen innerhalb jedes Pixels in der photoempfindlichen Matrix (siehe Abbildung 3.3). Im Falle der Überschußladung werden die Elektronen über ein mit geringer Steuerspannung (kleine Potentialwanne) gebildetes Gate-Gebiet ("overflow gate", OF-Gate) in das mit einer hohen Spannung angesteuerte n^+ -Drain-Gebiet abgeführt ("overflow drain", OF-Drain). Über die angelegte externe Spannung an das Gate ist es möglich, die Größe der Potentialwanne zu ändern und damit das Antiblooming an die Umgebungsbeleuchtung anzupassen. (Der Elektronenfluß in die andere Richtung wird durch den Kanalstopper verhindert). Der Nachteil dieser Struktur besteht in einem geringeren Füll-Faktor und der daraus resultierenden geringeren Empfindlichkeit des Sensors.

Ein vertikales Antiblooming ist ebenso in Abbildung 3.3 für CCD-Sensoren mit versenkten Kanälen, BCCDs (buried CCD) [26], dargestellt. Der vergrabene n^- -Kanal befindet sich zwischen p^+ -Kanalstoppern und gleichzeitig allen Strukturen, die in einer p-Wanne auf einem n-Substrat liegen. Um den angestrebten Mechanismus zu realisieren, ist an die p-Wanne eine



Abbildung 3.3: Der horizontale (links) und der vertikale (rechts) Antiblooming-Mechanismus beim FT-CCD-Sensor.

geringere DC-Spannung $(U_w \approx 0)$ und an das *n*-Substrat eine hohe Steuerspannung (z.B. 18 V) angelegt. Im Falle der Überschußladung wird das Potential im *n*-Kanal so hoch, daß der vertikale *n-p-n* Bipolartransistor leitend wird und die Überschußelektronen in das Substrat abführt. Dem kleinen Platzbedarf und geringerem Dunkelstrom stehen eine reduzierte Empfindlichkeit bei größeren Eindringtiefen und eine sehr aufwendige Optimierung dieser sehr komplizierten Technologie und Ansteuerung des Sensors bei dieser Methode gegenüber.

Die Maßnahmen zur Unterdrückung des Smearings bei FT-CCDs betreffen ebenso die Struktur dieses Sensortyps. So wird das Zurücksetzen der Ladungen aller Bildelemente vorgenommen, bevor mit der neuen Integration angefangen wird. Dadurch wird ein Teil des aus dem vorherigen Bild durch das letzte Takten der Steuersignale bedingten Smearings, welches vor der tatsächlichen Integration auftritt, unterdrückt. Der andere Teil des Smearings entsteht nach der Integration während des Ladungstransports in den Speicherbereich. Wenn mit Hilfe eines hellen Rechteckes das Nachziehen gemessen wird, dessen Größe 10% der Sensorgeometrie entspricht, kann die Größe, die den Nachzieheffekt bei einem FT-CCD charakterisiert, wie folgt berechnet werden:

$$S_m = 10 \frac{T_{tr}}{T_{int}}.$$
(3.7)

Dabei ist T_{tr} als die Zeit definiert, die zum Transport der Ladung vom Bildaufnahme- zum Speicherbereich benötigt wird, bzw. entspricht T_{int} der Integrationsdauer. Für eine Unterdrückung des Nachzieheffekts muß die Transportzeit klein gegenüber der Integrationszeit gewählt werden. Um andererseits die hohen Bildraten und kurzen Integrationszeiten zu erreichen, ist die Integrationszeit höchstens so groß wie die Transport-Zeit der Ladung vom Speicherbereich in das horizontale Register (entspricht der Bilddauer T_{Bild} reduziert um die Transportzeit T_{tr}) und kann in der Regel sogar eine Größenordnung kleiner sein.

Die Standard-Lösung zur Unterdrückung von Smearing, die eine externe Kompensation

durch Abziehen des zuvor ermittelten Mittelwertes des Smearing-Signals voraussetzt, ist für schnell bewegte Objekte nicht anwendbar [20]. Eine zeilenweise Kompensation erfordert eine Speicherung der Smearing-Signale für jede Zeile separat, nachdem die Bildinformation aus der Zeile gewonnen wurde [27]. Neben dem Nachteil eines doppelt so großen Speicherbereichs existiert noch ein ungelöstes Problem, daß im Falle einer Sättigung des Pixels in beiden Bildern eine Signalverfälschung eintritt (die Subtraktion eines gesättigten Pixels von einem gesättigten Pixel führt zur Fehlinformation). Der einzige effektive Ansatz, der das Smearing vollständig unterdrücken kann, benötigt (abhängig von der verwendeten Integrationsdauer) zusätzliche Maßnahmen in Form einer externen Licht-Sperre.

Eine Einstellung der Integrationszeit wird bei FT-CCDs mit Hilfe eines elektronischen Shutters geregelt, dessen Mechanismus auf dem Reset der Ladungen innerhalb der Pixel basiert. Abbildung 3.4 zeigt ein vereinfachtes Zeitschema der Abläufe von wichtigen Vorgängen in einem FT-CCD-Sensor, aus dem eine Regelung der Integrationsdauer zu entnehmen ist. Die Integrationszeit ist bei FT-CCDs entsprechend dem Systemtakt nach unten und andererseits abhängig von der Bilddauer reduziert um die Transferzeit der Ladungen aus dem Speicherbereich in das horizontale Register nach oben begrenzt. An dieser Stelle ist zu betonen, daß das Zurücksetzen aller Pixel, d.h. das Löschen der Information des vorherigen Bildes, die Resthelligkeit (Lag-Effekt, typisch für Bildröhren) vollständig beseitigt.



Abbildung 3.4: Reset- und Integrationszeit-Ansteuerung beim FT-CCD-Sensor.

Der Reset-Mechanismus als eine Realisierung des elektronischen Shutters verwendet die Struktur des horizontalen oder vertikalen Antiblooming (siehe Abbildung 3.3), indem zu dem beschriebenen Verfahren zusätzlich Resetpulse verwendet werden [28]. Für den Fall einer vertikalen Struktur sind hohe Pulse zur Ansteuerung der p^- -Wanne (Abbildung 3.3) notwendig, um absichtlich die zuvor gespeicherte Ladung in das Substrat abzuführen. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, daß sehr hohe Pulse über das Substrat Störungen in den gesamten Sensor einkoppeln und seine Stromversorgung stark belasten. Beim horizontalen Overflow wird das OF-Gate ebenso mit den Resetpulsen angesteuert, so daß die zuvor gespeicherte Ladung zum horizontalen OF-Drain abgeführt wird. Eine Einschränkung dieser Methode, neben dem genannten Übersprechen, liegt gerade in der Verwendung kurzer Integrationszeiten aufgrund einer undefinierten Ladungsverteilung zwischen dem OF-Drain und den CCD-Kanälen, in denen der Ladungstransfer zum Speicherbereich stattfindet.

In der Literatur (häufig sind nur Datenblätter verfügbar) sind einige Arbeitsgruppen zu finden, die sich mit der Herstellung von FT-CCD-Sensoren für hohe Bildraten beschäftigen. Zum einen handelt es sich um HS0256J bzw. HS0512J von EG&G/Reticon mit einer Auflösung von 256×256 bzw. 512×512 Pixel [29, 30]. Für eine Rate von 1000 Bilder/s benötigen sie bei einem Pixeltakt von 20 MHz vier bzw. sechzehn parallele Ausgangskanäle. Aufgrund der für das horizontale Antiblooming eingesetzten Strukturen haben die Pixel einen reduzierten Füll-Faktor, und damit verknüpft hat der Sensor eine reduzierte Empfindlichkeit. Als zweite Gruppe hat das David Sarnoff Lab. einen 512×512 Pixel großen Sensor entwickelt [31], der von hinten belichtet wird ("back illuminated sensor") und daher einen Füllfaktor von 100 % besitzt. Mit einer bemerkenswerten Vorversion dieses Sensors ist eine Kamera mit einer Bildrate von 820 Bilder/s realisiert worden [32]. Bei einer weiterentwickelten Ausführung des Sensors sind bei einem Drei-Phasen-Takt von 25 MHz die Bildraten von über 1000 Bilder/s erreicht worden. Bei höheren Bildraten zeigt der Sensor trotz der eingesetzten korrelierten Doppelabtastung (CDS - Correlated Double Sampling) eine schlechtere Bildqualität. Der Sensor verfügt über insgesamt sechzehn Kanäle, von denen jeweils acht in je einen Teil des aufgeteilten Speicherbereichs ausgeführt sind. Die von hinten belichteten Pixel ermöglichen einen Füll-Faktor von 100 %, wobei dies mit deutlich höherem technologíschen Aufwand verknüpft ist. Vergleichbar hiermit ist ein FT-CCD-Sensor mit 260×260 Pixel der Firma Dalsa [33], die ebenso einen Füll-Faktor von 100 % hat. Er verfügt ebenso über einen vertikalen Antiblooming-Mechanismus und erreicht bei einem Pixeltakt von 25 MHz und vier Ausgangskanälen eine Bildrate von 955 Bilder/s.

Alle erwähnten Sensoren erfordern im Vergleich zu den Standard-CMOS-Lösungen hohe Versorgungsspannungen (beispielsweise -6V und 12V beide EG&G/Reticon- bzw. -10V und +7V von David Sarnoff Lab.-Sensoren). Außerdem leiden alle Sensoren unter dem nur teilweise gelösten Problem des Smearings. Der einzige angegebene Wert von 0.5 % beim HS0256J für die maximale Integrationszeit von 970 μ s deutet darauf hin, daß er sich für Integrationszeiten im unteren Mikrosekundenbereich deutlich verschlechtert.

Das Problem des Nachziehens ist insbesondere bei einer vereinfachten Realisierung der FT-CCD-Sensoren kritisch, nämlich bei Full-Frame-CCD-Sensoren (FF-CCDs). Sie haben im Unterschied zu den FT-CCDs keinen Speicherbereich, so daß die in den Bildelementen akquirierte Ladung direkt in das horizontale Register transferiert wird. Der Vorteil einer kleineren Chipfläche dieser Struktur ist neben dem schlechteren Smearing mit der langsameren Pixelrate zu bezahlen. Ein Full-Frame Sensor (FF-CCD) der Firma EEV (English Electric Valve), CCD-13, mit der Auflösung von 512×512 Pixel und acht Ausgangskanälen ist in [34] präsentiert. Trotz eines Drei-Phasen-Taktes sind Pixelraten bis zu 20 MHz möglich und bei voller Auflösung erreicht der Sensor eine Bildrate von 600 Bilder/s bei einer Integrationszeit von 10 μ s. Für eine Kamerarealisierung schlagen die Autoren die Verwendung einer externen Shutterfunktion oder eine Erhöhung der Belichtungszeit in dem Maße vor, daß sie groß gegenüber der Auslesezeit ist, was zu signifikanten Einbußen bezüglich der Bildrate führt.

Nach einer Untersuchung der realisierten schnellen CCD-Sensoren [35] ist festgestellt worden, daß FT-CCDs eine Integrationszeit von 100 - 400 μ s und FF-CCDs eine Integrationszeit von 1 - 10 ms ohne einen bedeutsamen Nachzieheffekt gewährleisten. Da sie aufgrund des Ladungstransferprinzips störlichtempfindlich sind, besteht die einzige Möglichkeit, einen Nachzieheffekt bei kürzeren Integrationszeiten vollständig zu unterdrücken, in der Verwendung eines zusätzlichen externen optischen Verschlusses. In [36] präsentierte Hochgeschwindigkeits-Kameras mit FT-CCDs verwenden einen in Flüssigkeitskristall (liquid crystal display LCD) realisierten optischen Verschluß für Integationszeiten bis hinab zu 200 μ s. Für viele Anwendungen, für die insbesondere sehr kurze Integrationszeiten gebraucht werden, werden ähnlich wie bei Bildröhren Multikanalplatten benutzt, indem diese an die CCD-Sensoren optisch gekoppelt werden (MCPII - Multi Channel Plate Image Intesifier). Um eine Shutterfunktion zu gewährleisten [37], benötigen sie hohe Steuerspannungen, die insbesondere für sehr kleine Zeitauflösungen gute Signalgeneratoren voraussetzen und insgesamt zu einer sehr hohen Systemkomplexität führen.

3.2.2 Interline-Transfer CCD-Sensoren

Die zweite große und für Hochgeschwindigkeitsanwendungen wichtige Gruppe der CCD-Sensoren stellen IL-CCDs dar. Sie besitzen schon innerhalb des Bildaufnahmebereichs vom Licht abgeschirmte vertikale Register, die zum Ladungstransfer der akquirierten Bildinformation dienen (siehe Abbildung 3.2). Nach der abgeschlossenen Integration werden zuerst die Ladungen aus jedem Pixel in die zugehörigen benachbarten Zellen des vom Licht abgeschirmten vertikalen Schieberegisters geschoben. Anschließend beginnt der Ladungstransfer innerhalb der erwähnten Schieberegister in das horizontale Ausgangsregister bzw. danach zu der Ausgangsstufe, in der die Ladung in eine Spannung konvertiert wird. Die darauf folgende Integration eines neuen Bildes kann unmittelbar nach der Verschiebung der Ladung aus den Pixeln in die vertikalen Schieberegister erfolgen.

Ein großer Vorteil dieser Konfiguration ist eine kleinere Chipfläche als bei den FT-CCDs, die sich aufgrund des fehlenden Speicherbereichs ergibt. Aufgrund der Notwendigkeit von vertikalen Schieberegistern sinkt der Füll-Faktor, was gleichzeitig eine kleinere Empfindlichkeit des Sensors bedeutet. Zudem werden für IL-CCDs aufwendige Technologieschritte benötigt. Die Verwendung der abgeschirmten vertikalen Schieberegister selbst sowie die kleinere notwendige Taktrate hat einen großen Einfluß auf das Sensorverhalten bezüglich des Bloomings und des Smearings.

Ähnlich wie bei FT-CCDs entsteht das Blooming aufgrund der Überschußladung, wenn der Potentialtopf voll wird. Deswegen werden sehr ähnliche Maßnahmen zur Unterdrückung des Bloomings eingesetzt. So unterscheiden sich das horizontale und das vertikale Antiblooming bei IL-CCDs nur geringfügig von denjenigen bei FT-CCDs aus Abbildung 3.3. Die Pixelstruktur mit eingebauten Mechanismen für horizontales und vertikales Antiblooming ist für IL-CCDs in Abbildung 3.5 gezeigt.



Abbildung 3.5: Der horizontale (links) und der vertikale (rechts) Antiblooming-Mechanismus beim IL-CCD-Sensor.

Das horizontale Antiblooming enthält daher wiederum ein zusätzliches Gate ("overflow gate", OF-Gate) mit dem die Schwelle der externen Beleuchtung für die Überschußladung geregelt wird. Wenn der Potentialtopf voll ist, wird die Ladung über das zusätzliche Drain ("overflow drain", OF-Drain) abgeführt. Da für den Ladungstransfer bei IL-CCDs zusätzliche vertikale Schieberegister eingesetzt werden, ist an dem zusätzlichen Transfer-Gate eine Spannung so angelegt, daß der resultierende Potentialtopf über dem des OF-Gates liegt (keine Überschußladung kann in die Schieberegisterzelle gelangen). Die Struktur des horizontalen Antiblooming verringert wie die Schieberegisterzelle den Füllfaktor des Pixels und daher die Empfindlichkeit des Sensors. Das Prinzip des vertikalen Antibloomings bei einem IL-CCD unterscheidet sich vom demjenigen beim FT-CCD darin, daß die vertikale *n-p-n*-Struktur nur unterhalb der photoempfindlichen Fläche besteht. Die Struktur für den Ladungstransfer (die Zelle des vertikalen Schieberegisters) ist mit einem Transfergate von der photoempfindlichen Fläche getrennt. Zudem ist die ganze Pixelstruktur von einem p^+ Kanalstopper umgeben. Der angestrebte Mechanismus funktioniert mit geeignetem Biasing (p-Wanne wird mit DC-Spannung $U_w \approx 0$ und n-Substrat mit einer hohen DC-Spannung angesteuert) derart, daß die Überschußelektronen aufgrund des inzwischen leitenden vertikalen Bipolartransistors gemäß des geänderten Potentials in das Substrat abgeführt werden. Verglichen mit FT-CCDs stehen bei IL-CCDs dem kleinen Platzbedarf und geringerem Dunkelstrom eine reduzierte Empfindlichkeit bei größeren Eindringtiefen und für die Realisierung dieser Methode eine noch aufwendigere Sensoroptimierung und -ansteuerung gegenüber.

Das Smearing entsteht bei dieser CCD-Sensorgruppe ähnlich wie bei den FT-CCDs während des Ladungstransfers. Aufgrund des abgeschirmten vertikalen Schieberegisters hat es bei IL-CCDs aber eine andere Herkunft. Neben dem direkten Einfluß des parasitären Lichtes während des Schiebevorgangs der Ladung aus dem photoempfindlichen Bereich in die vom Licht abgeschirmten Zellen des vertikalen Schieberegisters gibt es zwei weitere Effekte, die zum Smearing führen. Zum einen handelt es sich dabei um durch Streuelektronen hervorgerufene parasitäre Leckströme und zum anderen um eine durch eine mehrfache Reflexion der Photonen an der Oberflächenstruktur des Sililziums verursachte Photokonversion innerhalb der Schieberegisterzelle [38]. Neben den technologischen Maßnahmen, den Einfluß von Streuelektronen als auch eine mehrfache Reflexion an der Oberflächenstruktur des Siliziums zu unterbinden, ist wie bei FT-CCDs ein Zurücksetzen der gespeicherten Ladung möglich. Diese Maßnahmen zeigen bei IL-FFTs vergleichsweise bessere Ergebnisse als bei ihren Kontrahenten.

Ähnlich wie bei FT-CCDs ist eine Einstellung der Integrationszeit bei IL-CCDs mit Hilfe eines eletronischen Shutters möglich, indem die begonnene Integration mit einer Resetoperation verkürzt wird. Dabei ist ein vergleichbares vertikales Antiblooming nicht möglich, da aufgrund der hohen Spannungen der Resetpulse (angewendet an der p^- -Wanne in Abbildung 3.5) ein vertikaler Bipolartransistor für die Ladungsabfuhr in das Substrat auch in der Schieberegisterzelle wirksam wäre. Dagegen kann das horizontale Reset-Verfahren eingesetzt werden, bei dem das OF-Gate gepulst wird, um die integrierte Ladung in OF-Drain abführen zu können. Neben den beschriebenen Nachteilen dieses Verfahrens wie ein sehr kleiner Füll-Faktor und eine aufwendige Optimierung und Ansteuerung des Sensors kommen wie bei FT-CCDs die Probleme des Übersprechens sowie der undefinierten Ladungsverteilung zwischen OF-Drain und Schieberegisterzelle bei kurzen Integrationszeiten hinzu.

Ein oft verwendetes Verfahren zur Regelung der Integrationszeit basiert auf einer Abfuhr der Ladung über die gleichen vertikalen Schieberegister in eine außerhalb des Bildaufnahmebereichs realisierte Senke. Eine Einschränkung dieses Verfahrens besteht darin, daß der Reset der Ladung während des Ladungstransfers der gewonnenen Bildinformation nicht stattfinden darf. Damit kann die geregelte Integrationsdauer entweder der Differenz der Bilddauer und der Zeit entsprechen, die zum Transfer der Signalladung und der Abfuhr der parasitären Ladung notwendig ist, oder sie ist gleich der gesamten Bilddauer für den Fall, daß das Zurücksetzen der Ladung entfällt (siehe Abbildung 3.6).

In der Literatur sind einige interessante Realisierungen von IL-CCD High-Speed-Sensoren zu finden. So ist in [39] eine von EG&G/Los Alamos Nat. Lab. entwickelte Hochgeschwindigkeitskamera präsentiert, die einen 1024 × 256 Pixel großen IL-CCD-Sensor benutzt. Der Sensor liefert bei einer Pixelrate von 20 MHz (ein Zwei-Phasen-Takt ist notwendig) und sechzehn Ausgangskanälen eine Rate von 1000 Bilder/s. Bei einem 25%-igen Füll-Faktor verfügt der Sensor sowohl über einen vertikalen als auch über einen lateralen Anti-Blooming-Mechanismus. Eine in [40] präsentierte Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Kodak ver-



Abbildung 3.6: Reset- und Integrationszeit-Ansteuerung beim IL-CCD-Sensor.

fügt über einen 512×384 Pixel großen IL-CCD-Sensor, der Raten von 1000 Bilder/s bei einer Integrationszeit von 100 μ s erreicht. Die Integrationszeit kann gemäß der in Abbildung 3.6 präsentierten Signalabläufe geregelt werden. Während Angaben über Smearing nicht gemacht worden sind, wurde der Anti-Blooming-Mechanismus als sehr gut bezeichnet. Basierend auf der Architektur dieses Sensors hat diese Firma als einer der Marktführer die ganze Serie EKTAPRO entwickelt [41]. Eine weitere bemerkenswerte Lösung der IL-Architektur ist ein EG&G/Reticon CCD-Sensor mit 512×512 Pixeln [38]. Mit einem Zwei-Phasen-Takt und sorgfältig entworfener Ausleseelektronik erreicht der Sensor 1000 Bilder/s bei 40 MHz Pixelrate an jedem von acht parallelen Ausgangskanälen. Trotz eines sehr aufwendig realisierten vertikalen Antibloomings und des mit vertikalen Strukturen realisierten elektronischen Shutters (für diesen Zweck wird speziell das *n*-Gebiet in Abbildung 3.5 getaktet) beträgt der Füll-Faktor nur 25 %. Dieser Sensor sowie die zwei zuvor vorgestellten Sensoren benötigen wiederum hohe Versorgungsspannungen, die mit standard integrierten Lösungen überhaupt nicht kompatibel sind.

3.2.3 Frame-Interline-Transfer CCD-Sensoren

Eine bemerkenswerte Konfiguration der CCD-Sensoren sind die FIT-CCDs, die eine Kombination der ersten zwei Gruppen darstellen. Sie besitzen wie IL-CCD-Sensoren einen photoempfindlichen Bildaufnahmebereich, wobei ein Pixel über ein photoempfindliches Bauelement und eine dazu gehörige Zelle des vertikalen Schieberegisters verfügt. Zugleich haben diese Sensoren wie FT-CCDs einen vollständig abgeschirmten Speicherbereich. Bei diesem Sensortyp werden Nachzieheffekte aufgrund einer hohen erzielbaren Transfergeschwindigkeit in den abgeschirmten vertikalen Schieberegistern vom Bildaufnahme- in den Speicherbereich ausgezeichnet unterdrückt. Dies geschieht allerdings zu Lasten eines kleineren FüllFaktors, einer größeren Chipfläche (bei unveränderter Auflösung) und einem höheren technologischen Realisierungsaufwand. Das Antiblooming und der elektronische Shutter (Reset-Mechanismus) sind realisiert wie bei IL-CCDs, wobei die Integrationszeit innerhalb der Bilddauer beliebig einstellbar ist. Obwohl diese Konfiguration sich für Hochgeschwindigkeitsanwendungen eignen würde, sind nach aktuellem Kenntnisstand keine Realisierungen aus der Literatur bekannt.

3.2.4 Burst-Modus-CCD-Sensoren

Eine spezielle Klasse von CCD-Sensoren für die Bildakquisition bei sehr hohen Bildraten, die gleichzeitig eine sehr kleine Speichertiefe besitzen, stellen CCD-Sensoren im sog. Burst-Modus dar. Diese Sensoren haben einen On-Chip-Speicher, so daß basierend auf beschriebenen CCD-Sensoren zur Akquisition der Daten mit hoher Pixelrate durch eine mehrkanalige Struktur eine Realisierung von sehr hohen Bildraten möglich ist. Spezifisch für diese Sensorklasse ist, daß die Aufnahme bei hohen Bildraten nach der Akquisition und Speicherung der Bilder unterbrochen wird, um die gespeicherten Daten aus dem Sensor langsamer auszulesen. Aufgrund der kleinen Anzahl der Bilder, die gespeichert werden können, und der Pausen zwischen den Gruppen von aufgenommenen Bildern sind die Anwendungen beschränkt auf Prozesse, die naturgemäß diesem Betrieb entsprechen. Insbesondere interessant sind Anwendungen auch bei Ultra-Hochgeschwindigkeitsprozessen, bei denen eine geringe Anzahl der Bilder bei sehr hohen Bildraten aufzunehmen sind.

Ein in [42] vorgestellter 256×256 Pixel großer Sensor mit der Möglichkeit zu Datenspeicherung innerhalb der Pixel ermöglicht eine Bildrate von $3 \cdot 10^7$ Bilder/s mit einer Speichertiefe von acht Bildern. Diese Bildrate entspricht dem Kehrwert der Dauer einer Datenverschiebung aus einer optisch wirksamen in die abgeschirmte Speicherfläche. Damit entspricht dieser Bildsensor bei einer Speichertiefe von einem Bild der Funktionalität eines IL-CCD-Sensors. Wird die Auflösung reduziert, erhöht sich die Speichertiefe, weil für die Photokonversion unbenutzte Pixel für den Speicher verwendet werden. In [43] ist ein Sensor mit 360×360 Pixeln bei einem Füll-Faktor von 13.5% vorgestellt, der insgesamt 30 hintereinander folgende Werte innerhalb eines Pixels speichern kann. Sein seriell-paralleles Speicherregister ist mit einem Drei-Phasen-Takt angesteuert, so daß die maximale Bildrate $8.33 \cdot 10^5$ Bilder/s beträgt. In [44] wurde ein Sensor präsentiert, der von einer konventionellen HDTV-Auflösung einen Teil als optisch wirksame Fläche und den anderen größeren Teil als Speicher verwendet. Je nach Organisation des $2K \times 2K$ Pixel großen Sensors bzw. seines Ladungstransfers sind die Bildraten von z.B. 4000 Bilder/s mit einer Auflösung von 256×256 Pixel und 64 gespeicherten Bilder realisiert worden.

3.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sind integrierte Bildsensoren auf Basis der CCD-Technik für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vorgestellt worden. Ihre zahlreichen Vorteile gegenüber den klassischen Lösungen wie beispielsweise geringere Steuerspannungen, kompaktere und rauschärmere Lösungen, Verwendung der konventionellen Speicherbausteine anstatt des Films als Speichermedium usw. haben dazu geführt, daß heutzutage die CCD-Bildsensorik den Stand der Technik für die Hochgeschwindigkeitsanwendungen darstellt. Als funktionsmäßig und preislich deutlich den anderen Systemen überlegen, werden sie hauptsächlich für Anwendungen mit Belichtungszeiten im Millisekunden- und oberen Mikrosekundenbereich verwendet.

Dieses Kapitel hat sich außerdem mit der Problematik der CCD-Technik, die im allgemein für die integrierte Bildsensorik relevant ist, näher beschäftigt. Für die verschiedenen Konfigurationen (FT-CCDs, IL-CCDs, FIT-CCDs usw.) sind typische Probleme der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sowie Maßnahmen zur Unterdrückung oder Beseitigung derselben vorgestellt und anschließend ein kurzer Marktüberblick gegeben worden.

So besitzen FT-CCD-Pixel einen sehr großen Füll-Faktor und benötigen verglichen mit den anderen Konfigurationen einfachere technologische Schritte. Dem gegenüber steht eine aufgrund des benötigten Speicherbereichs größere Chipfläche. Die Probleme der Uberschußladung aufgrund der starken Beleuchtung werden meistens mittels horizontaler ("overflow drain") oder vertikaler Antiblooming-Mechanismen effizient unterdrückt. Für die Nachzieheffekte gibt es unter verschiedenen Ansätzen keine leistungsfähigen On-Chip Lösungen, die sich für Hochgeschwindigkeitsanwendungen eignen. So kann der Einfluß von Smearing bei kurzen Integrationszeiten, wo der Anteil der Smearsignale im Vergleich zu dem der Nutzsignale sehr hoch ist, nur mit externen Bausteinen wie beispielsweise mit einem in Flüssigkeitskristallen (LCDs) oder mit Multikanalplatten realisierten optischen Verschluß unterdrückt werden. Je nach Realisierung ist es möglich, FT-CCDs ohne externen Verschluß für die Integrationszeiten nur bis hinab zu 200 - 400 μ s zu verwenden. Eine Realisierung eines elektronischen Shutters für die Regelung der Integrationszeit basiert auf dem Reset-Mechanismus, bei dem die zuvor gesammelten Ladungen abgeführt werden. Dabei entstehen bei geeignetem Pulsen der für diesen Zweck verwendeten horizontalen und vertikalen Antibloomingstrukturen Probleme wie das starke Übersprechen oder Undeutigkeiten bei der Ladungsverteilung (zwischen dem "overflow drain" und dem CCD-Kanal).

Bei FF-CCDs, die eine vereinfachte Version von FT-CCDs darstellen, entfällt der Speicherbereich und damit die beanspruchte Chipfläche. Den Vorteilen des hohen Füll-Faktors und einer einfachen Realisierung steht ein noch stärkeres Smearing gegenüber, da sich die Zeit des Ladungstransfers, in der das parasitäre Licht einen Einfluß hat, verlängert. Bei diesen Sensoren ist der Bedarf nach einem externen optischen Verschluß noch größer, da je nach Realisierung das Smearing für die Integrationszeiten nur bis hinab zu 1 - 10 ms ohne zusätzlichen Verschluß vernachlässigt werden kann. Die Realisierung von Antiblooming und einem elektronischen Shutter gleicht derjenigen wie bei FT-CCDs und ist somit mit den gleichen Problemen verknüpft.

IL-CCDs besitzen aufgrund der eingesetzten vertikalen Schieberegister Pixel mit geringerem Füll-Faktor und daher mit einer schlechteren Empfindlichkeit. Obwohl der Speicherbereich nicht vorhanden ist, ist ihre technologische Realisierung mit aufwendigeren Schritten verknüpft. Der verwendete horizontale und vertikale Antiblooming-Mechanismus unterscheidet sich nur geringfügig von denen, die bei FT-CCDs eingesetzt werden. Das Problem von Smearing ist bei diesen Sensoren anders, da zum einen der direkte Einfluß von parasitärer Beleuchtung viel geringer ist und zum anderen der Einfluß von Streueffekten berücksichtigt werden muß. Insgesamt führt das dazu, daß IL-CCDs im Unterschied zu den FT-CCDs keinen externen optischen Verschluß benötigen. Für die Realisierung des elektronischen Shutters kommt nur der vergleichbare horizontale Reset-Mechanismus in Frage, der allerdings aufgrund eines damit noch kleineren Füll-Faktors eines IL-CCDs sehr selten verwendet wird. Bei IL-CCDs ist es üblich, die Ladung über die existierenden vertikalen Schieberegister in eine speziell gefertigte Senke abzuführen. Beide Verfahren leiden unter dem starken Einfluß des unerwünschten Übersprechens auf dem Chip.

Die letzte Gruppe der CCD-Sensoren, die sog. Burst-Modus-CCDs für Hochgeschwindigkeitsanwendungen ermöglichen sehr hohe Bildraten bei gleichzeitig kleiner Speichertiefe. Daher eignen sich diese Sensoren nur für die Anwendungen, wo entweder die Anzahl der aufzunehmenden Bilder sehr klein ist oder wo die aufzunehmenden Prozesse eine ähnliche Burst-Modus-Natur aufweisen.