

# Kapitel 6

## Anwendungsmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeits-CMOS-Bildsensoren

Im Rahmen dieses Kapitels sollen Möglichkeiten für eine Implementierung der realisierten CMOS-Bildsensoren in verschiedenen Anwendungen präsentiert werden. Über die angestrebten Anwendungen in der Hochgeschwindigkeitskinematographie hinaus werden einige Anwendungsgebiete aufgezeigt, für die sich der Einsatz von Hochgeschwindigkeitssensoren besonders eignet. Aufgrund der Möglichkeit, die Sensoren auch bei niedrigeren als den Hochgeschwindigkeits-Bildraten, d.h. bei Bildraten zwischen TV-Bildraten und 1000 Bilder/s zu betreiben, ist ein Einsatz für Maschinelles Sehen in der industriellen Bildverarbeitung von Interesse. Für industrielle Anwendungen verdient der Einsatz der entwickelten CMOS-Bildsensoren insbesondere aufgrund ihrer sehr kurzen Integrationszeiten und hohen Bildraten eine große Aufmerksamkeit für die optische Meßtechnik und für die darauf basierenden Aufgaben. Schließlich eignen sich diese CMOS-Bildsensoren für bestimmte Überwachungszwecke, wobei auf der Basis kurzer Integrationszeiten und hoher Bildraten der Einfluß von Hintergrundrauschen bei angepasster Sensoransteuerung unterdrückt wird.

Im folgenden werden zunächst experimentelle Ergebnisse für die Hochgeschwindigkeitskinematographie vorgestellt. Dabei werden Möglichkeiten und Vorteile von integrierten CMOS- gegenüber CCD-Bildsensoren hervorgehoben. Anschließend wird aufgezeigt, wie CMOS-Bildsensoren für Maschinelles Sehen, optische Meßtechnik und Überwachungszwecke eingesetzt werden können [97–100].

### 6.1 Aufzeichnung von schnell ablaufenden Ereignissen

Die Palette der angestrebten möglichen Einsätze der Hochgeschwindigkeitskinematographie reicht von verschiedenen Anwendungen im industriellen bis in den wissenschaftlichen Be-

reich. So besteht in der Automobil- und Flugzeugindustrie ein großer Bedarf an der Durchführung von Crash-Tests, Untersuchungen im Motorbetrieb, der Fahrwerksbeobachtung sowie in der Automatisierungstechnik an der Überwachung und der Analyse verschiedener Prozeßlinien zur Fehlersuche oder zur Verfahrensoptimierung. Die Aufzeichnung schnell ablaufender Ereignisse ist ebenso in Bereichen der Metallindustrie, der Medizin, der Ballistik, und schließlich in der Kernforschung von großer Bedeutung. In all diesen aufgezählten Gebieten ist für die Analyse der aufgenommenen Ereignisse eine gute Bildqualität von großer Bedeutung. Im allgemeinen findet der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera bei diesen Anwendungen unter definierten Beleuchtungsverhältnissen statt, so daß die Dynamik der eingesetzten Sensoren den Werten entsprechen kann, die bei Standard-Videosystemen üblich sind. Insgesamt ist man aber bemüht, lichtempfindlichere Sensoren einzusetzen, die gleichzeitig gegenüber parasitären Effekten bei schnellen Aufnahmen wie z.B. Smearing, Blooming usw. (siehe Kapitel 3) unanfällig sind.

Die im fünften Kapitel präsentierten CMOS-Bildsensoren haben mit ihren technischen Eigenschaften das angestrebte Ziel der Aufzeichnung von schnell ablaufenden Ereignissen vollständig und erfolgreich erreicht. Einige der mit beiden realisierten CMOS-Bildsensoren aufgenommenen Bildsequenzen demonstrieren ihre Fähigkeit, schnell ablaufende Ereignisse verfälschungsfrei wiederzugeben. In Abbildung 6.1 und 6.2 sind Bilder zweier aufgenommener Szenen mit dem zunächst vorgestellten Bildsensor mit  $128 \times 128$  Pixel dargestellt. Die beiden Sequenzen geben bei einer Bildrate von 1030 Bilder/s und einer Integrationszeit von  $100 \mu\text{s}$  die Bildinformation ohne Hinweise auf Smearing, Blooming oder Verzerrungen (in englischem: blur) wieder. Zudem sind keine Nachlaufeffekte („time lag“) festzustellen. Die Abbildungen 6.3 und 6.4 präsentieren ähnliche, schnelle Vorgänge, aufgenommen mit dem  $256 \times 256$  Pixel CMOS-Sensor. Bei diesen Sequenzen ist eine sehr gute Bildqualität direkt aus dem Bildsensor (ohne jegliche Off-Chip Korrektur) mittels der im fünften Kapitel vorgestellten schaltungstechnischen On-Chip Maßnahmen erreicht worden. Neben der Unterdrückung von Smearing, Blooming und Verzerrungen, die aufgrund der schnellen Bewegung verursacht werden könnten, bietet dieser Sensor gemäß seiner höheren Auflösung mehr Information und keine Alias-Effekte. Die Aufnahmen sind ebenso bei einer Integrationszeit von  $100 \mu\text{s}$  und einer Bildrate von 1040 Bilder/s gemacht worden.

Gegenüber den im dritten Kapitel präsentierten CCD-Sensoren für Hochgeschwindigkeitsanwendungen bieten die entwickelten CMOS-Bildsensoren bei einer vergleichbaren hochwertigen Bildqualität eine Reihe anderer Vorteile. So wird eine zuverlässige und einfache Realisierung von kurzen Integrationszeiten gewährleistet. Der im vierten Kapitel vorgestellte elektronische Shutter im Pixel ermöglicht eine störungsfreie Regelung der Integrationsdauer, die im Vergleich zu den verwendeten Maßnahmen bei allen CCD-Sensortypen (Resetmechanismus zur Ladungsabfuhr) kein Übersprechen über das Substrat auslöst. Zudem findet bei einer vollständigen Entkopplung der aufgenommenen Signalinformation vom photoempfindlichen Bauelement im Pixel eine zerstörungsfreie Auslese statt. Vergleichsweise verfügen

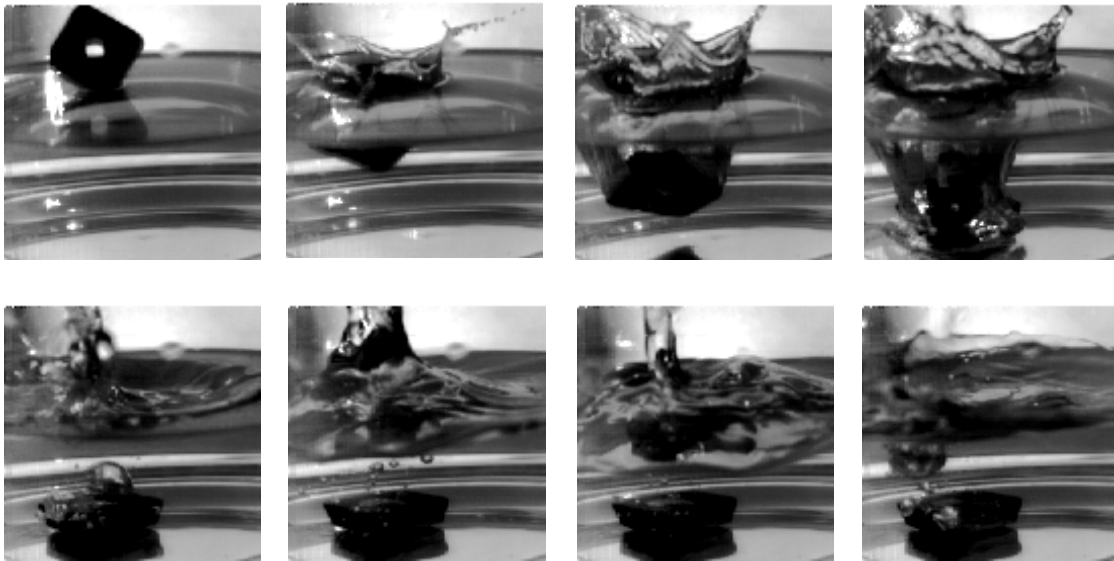


Abbildung 6.1: Sequenz eines in Wasser fallenden Objektes aufgenommen mit dem  $128 \times 128$  Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Integrationszeit von  $100 \mu\text{s}$  und einer Bildrate von 1030 Bilder/s.

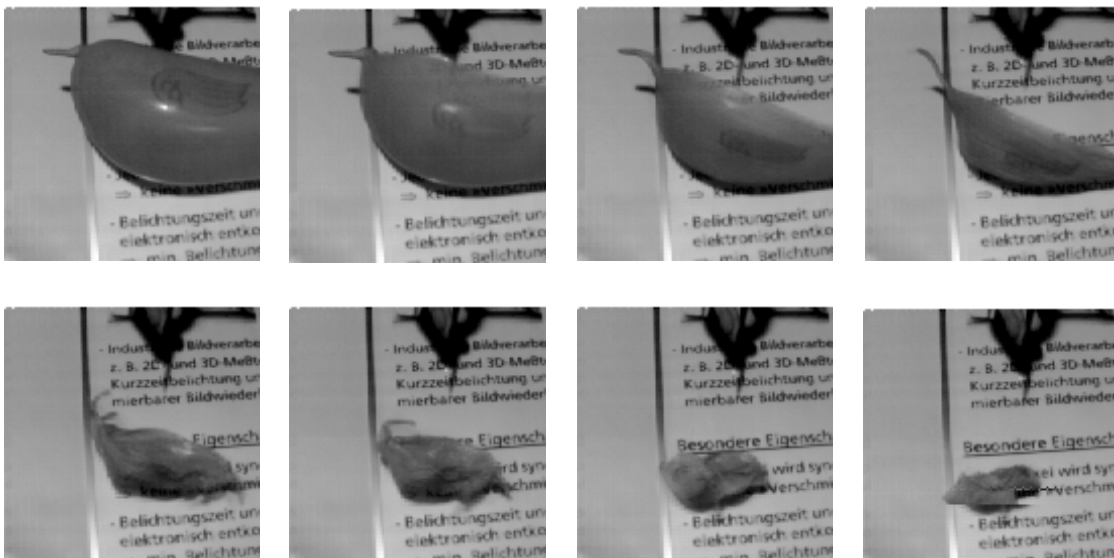


Abbildung 6.2: Sequenz von aufeinanderfolgenden Bildern eines platzenden Ballons aufgenommen mit dem  $128 \times 128$  Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Integrationszeit von  $100 \mu\text{s}$  und einer Bildrate von 1030 Bilder/s.

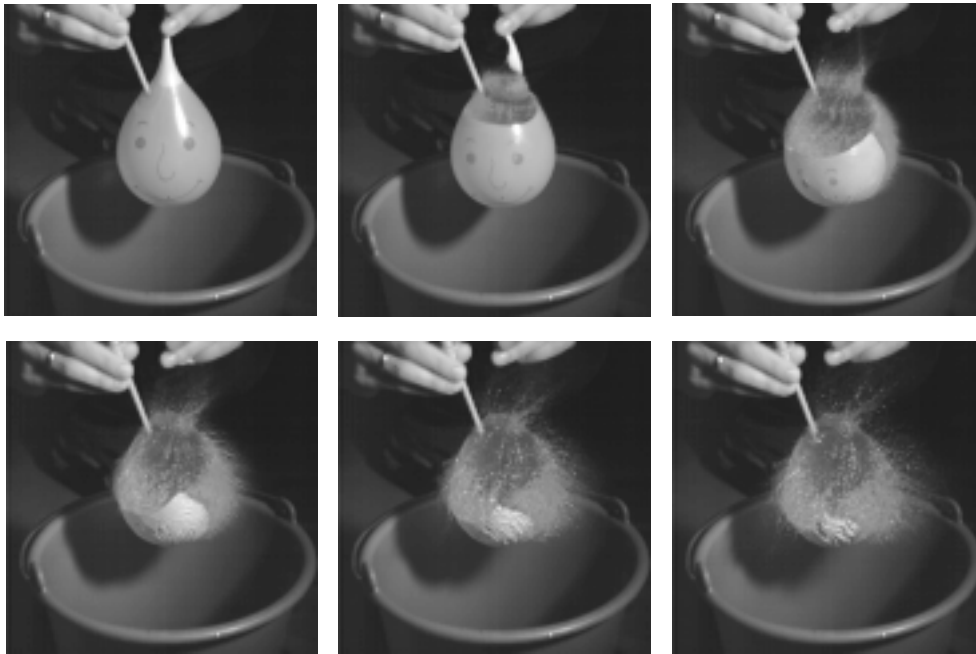


Abbildung 6.3: Aufgenommene Sequenz des mit Wasser gefüllten platzenden Ballons, bei dem jedes zweite Bild innerhalb der Sequenz ausgeblendet ist. Die Aufnahme ist mit dem  $256 \times 256$  Pixel CMOS-Bildsensor bei Integrationszeiten von  $100 \mu\text{s}$  und einer Bildrate von 1040 Bilder/s durchgeführt worden.



Abbildung 6.4: Sequenz von aufeinanderfolgenden Bildern eines platzenden Ballons aufgenommen mit dem  $256 \times 256$  Pixel CMOS-Bildsensor bei Integrationszeiten von  $100 \mu\text{s}$  und einer Bildrate von 1040 Bilder/s.

weder FT- noch IL-CCDs über eine zerstörungsfreie Auslese. Aufgrund einer guten Abschirmung der gespeicherten Bildinformationen im Pixel vor dem Einfluß des parasitären Lichts werden für die Anwendung in der Hochgeschwindigkeitskinematographie die Integrationszeiten von 1 – 150  $\mu$ s bei einer sehr guten Unterdrückung von Smearingeffekten gewährleistet. Dies stellt einen zusätzlichen Vorteil gegenüber CCD-Sensoren dar. Um solche kurzen Integrationszeiten zu realisieren, benötigen FT-CCDs einen zusätzlichen externen optischen Verschuß, so daß ihr Vorteil des höheren Füllfaktors eine sekundäre Bedeutung bekommt. IL-CCDs leisten dagegen ihrer Natur gemäß eine bessere Unterdrückung von Smearing und Verschmierungen (blur) bei einem vergleichbaren oder schlechteren Füllfaktor als bei CMOS-Bildsensoren. Zudem verschärft sich das erwähnte Problem des Übersprechens mit einer Verkürzung der Integrationsdauer.

Der letzte entscheidende Vorteil der CMOS-Bildsensoren gegenüber den CCD-Sensoren stellt eine Möglichkeit der Standard-CMOS-Technologie zur einfachen Realisierung der schaltungstechnischen Maßnahmen zur Rauschunterdrückung dar. So erfordern CCD-Sensoren für On-Chip-Funktionen zusätzliche technologische Schritte, die den ohnehin schon großen technologischen Aufwand dieser speziellen Technologie weiterhin enorm erhöhen würden. Daraus folgt ein sehr wichtiger wirtschaftlicher Aspekt, der letztendlich eine entscheidende Rolle für zukünftige Einsätze der integrierten CMOS-Bildsensoren für Hochgeschwindigkeitskinematographie spielen wird.

## 6.2 Maschinelles Sehen

Die Fähigkeit der präsentierten CMOS-Bildsensoren, eine Bildakquisition bei kleineren als bei den angestrebten Hochgeschwindigkeits-Bildraten (d.h. bei Bildraten zwischen 50 und 1000 Bilder/s) zu realisieren, eröffnet Möglichkeiten für den Einsatz dieser Sensoren für Maschinelles Sehen. Beim Maschinellen Sehen ist nicht das Bild als Ausgangswert, sondern die daraus extrahierte Information von Interesse. Unter den verschiedenen Klassen der Bildsensoren für diese Anwendung unterscheidet man zwischen Lösungen, bei denen eine gewisse Signalverarbeitung direkt On-Chip durchgeführt wird (z.B. Kantenextraktion, Filterfunktionen usw.) und Bildsensoren, die dafür sorgen, Bildinformationen zu ermitteln, die mit leistungsfähigen DSPs oder Mikroprozessoren in konventionellen PCs weiter verarbeitet werden können [13]. Unter Berücksichtigung eines immer stärkeren Wachstums und der rasanten Entwicklung von DSPs und Mikroprozessoren in den letzten Jahren stellt sich oft die Frage nach der Wirtschaftlichkeit bei der Fertigung der speziellen Bildsensoren mit einfacher On-Chip Signalverarbeitung, zumal diese alleine für eine Bildanalyse oft nicht ausreichen.

Die hier präsentierten CMOS-Bildsensoren zählen zu der zweiten Klasse der Lösungen im Maschinellen Sehen, bei denen unter den gerade beschriebenen Aspekten die weitere Signalverarbeitung im Mikroprozessor des PCs durchgeführt wird. Ein entscheidender Vor-

teil der entwickelten Bildsensoren stellt gerade die Tatsache dar, daß es einen sehr hohen Bedarf an Bildsensoren gibt, die die Lücke zwischen den preiswerten Bildsensoren für Videoanwendungen und den teuren Bildsensoren für Hochgeschwindigkeitsanwendungen schließen sollen. Für viele Anwendungen des Maschinellen Sehens reichen Bildsensoren mit TV-Bildraten sowie Lösungen auf deren Basis angepaßter, speziell entwickelter Kamerasysteme häufig nicht mehr aus. Andererseits werden aus ökonomischen Gründen Lösungen mit Hochgeschwindigkeitssensoren oft nicht angegangen. Insbesondere können Anwendungen wie Bewegungsvektor-Schätzung [101] von dem Einsatz der CMOS-Bildsensoren bei Bildwiederholraten zwischen 200 und 800 Bilder/s profitieren. Bei diesem zweidimensionalen Korrelationsverfahren als einem wichtigen Ansatz der Überwachungstechnik könnte das Suchfenster in  $x$ - und  $y$ -Richtung verkleinert werden. Dies resultiert aus der höheren zeitlichen Abtastrate (Bildwiederholrate) und der damit verknüpften geringeren Bewegung der Objektabbildung innerhalb des Bildsensors. Weil bei einer Verdoppelung der Bildrate das Suchfenster in jeder Richtung halbiert werden kann, reduziert sich die Anzahl der Operationen um den Faktor vier. Eine Verdoppelung der Bildrate erhöht dagegen den Rechenaufwand bezüglich der gesamten Pixelzahl um den Faktor zwei, so daß sich insgesamt eine Reduktion des Rechenaufwands und damit ein Gewinn bei dieser Methode um den Faktor zwei ergibt. Die Anwendung der Bildsensoren für Maschinelles Sehen setzt dennoch aufgrund der höheren Bildraten den Einsatz von leistungsfähigen Prozessoren voraus, die in den letzten Jahren, wie schon erwähnt, einen bemerkenswerten Leistungsaufschwung selbst im Bereich der konventionellen PC-Rechner zu verzeichnen hatten.

Die Einsatzgebiete dieser Sensoren für Maschinelles Sehen erschließen vor allem industrielle Anwendungen in den Bereichen wie Automatisierungstechnik und Qualitätskontrolle. So können die entwickelten CMOS-Bildsensoren in einer Ankopplung mit der externen Standard-Bildverarbeitung wie z.B. Segmentierung, Mustererkennung, Klassifizierung usw. die verschiedenen Aufgaben für schnell ablaufende industrielle Prozesse lösen. Die Beispiele reichen von der Sortierung zu verarbeitender Gegenstände, einer Überwachung von Bewegungen für die Sicherheitskontrolle bis hin zu einer Oberflächeninspektion der gefertigten Produkte usw. [102, 103].

Die Fähigkeit der entwickelten CMOS-Bildsensoren für den Betrieb bei den erwähnten Bildraten resultiert aus einer flexiblen Sensoransteuerung, die eine Beibehaltung der wichtigen Sensoreigenschaften bei den kleineren als Hochgeschwindigkeits-Bildraten voraussetzt. Gemäß der eingesetzten Pixelstruktur ermöglicht der Speicherkondensator in den Pixeln eine Aufbewahrung der Information nicht nur bei den kurzen Bilddauern, sondern auch bei den Bilddauern, deren Länge bis auf diejenigen vergrößert werden kann, die den TV-Bildraten entsprechen. Der größere Einfluß vom Dunkelstromrauschen bei längeren Integrationszeiten beeinträchtigt die Funktionalität der Bildsensoren dabei unbedeutend. Zwei mit den entwickelten CMOS-Bildsensoren aufgenommenen Bilder zeigen in Abbildung 6.5 die Aufnahmen bei kleineren Bildraten.



Abbildung 6.5: Testbilder, die mit dem entwickelten  $128 \times 128$  Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Bildrate von 100 Hz und 9 ms Integrationszeit (links) und mit dem entwickelten  $256 \times 256$  Pixel CMOS-Bildsensor bei einer Bildrate von 200 Hz und 4 ms Integrationszeit (rechts) aufgenommen wurden.

### 6.3 1D- und 2D-Abstandsmeßtechnik

In den letzten Jahren gibt es große Anstrengungen in der Entwicklung leistungsfähiger Meßsysteme, die ihre Anwendungen in intelligenten Systemen der industriellen Automatisierung finden. Die Vielzahl der 3D-Meßsysteme basieren oft auf komplizierten und stark justierungsbedürftigen Lösungen, die oft zu teuren oder sogar teilweise wirtschaftlich eingeschränkten Ergebnissen führen.

So werden die interferometrischen Verfahren wie die klassischen Lösungen auf Basis der Zweistrahlinterferometrie (wie z.B. Michelson-, Mach-Zehnder-Interferometer usw.), der Mehrfachreflexionen oder der Moiré- und Holographische Verfahren eingesetzt [104]. Diese hochgenauen Methoden, die ein kohärentes Licht und oft aufwendige Kalibrationsvorgänge benötigen, werden für Oberflächenvermessungen und -inspektionen im  $\mu\text{m}$ -Bereich verwendet. Die verschiedenen Triangulationsmethoden und Laufzeitverfahren eignen sich dagegen i.a. mehr für schnellere Messungen, die eine geringere Genauigkeit aufweisen müssen.

Im folgenden werden Anwendungen der entwickelten CMOS-Bildsensoren für die Triangulation und die Laufzeitmessung präsentiert. Dabei wird in beiden Fällen der Betrieb der realisierten Systeme mit einer aktiven Beleuchtung [105] vorgeschlagen. Für die angestrebten Anwendungen auf dem Prinzip des Lichtschnittverfahrens (Triangulation) und auf einer direkten Lichtlaufzeitmessung („time-of-flight“) in der Kombination mit der erwähnten modulierten Beleuchtung, d.h. in beiden Fällen mit strukturiertem Laserlicht, wird die Fähigkeit der CMOS-Bildsensoren für den Betrieb mit den sehr kurzen Integrationszeiten und schnellen Bildraten ausgenutzt. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten der CMOS-Bildsensorik auf Basis dieser Methoden für Anwendungen in der schnellen 3D-Vermessung, Lagebestimmung, Bewegungskontrolle, Navigation, Sicherheitsbereich usw. aufgezeigt.

### 6.3.1 Aktive Triangulation

Das Triangulationsverfahren als eine der ältesten Methode für die Tiefenbestimmung basiert auf einem geometrischen Ansatz bei der Vermessung von Raumpunkten. Dabei wird das projizierte Licht von dem Objekt diffus reflektiert und auf dem Sensor abgebildet. Abhängig davon, wie das Licht auf das Objekt projiziert wird, gibt es verschiedene Ansätze, die verschiedene Informationen und daraus folgend unterschiedliche Meßgenauigkeiten liefern. Die verschiedenen Triangulationsverfahren gliedern sich gemäß der verwendeten strukturierten Beleuchtung zu Verfahren mit

- punktueller Ausleuchtung
  - im einfachen Betrieb,
  - im kodierten Betrieb,
  - im Laser-Scan-Betrieb, usw.
- Ausleuchtung mit fächerförmigem Lichtstrahl (Lichtschnittverfahren) und
- Verwendung von zwei Kameras - Stereoskopie<sup>1</sup>

Ziel dieses Unterkapitels ist es, eine schnelle und effiziente Methode, die basierend auf dem Lichtschnittverfahren unter Verwendung der entwickelten CMOS-Bildsensoren und Ausnutzung ihrer Eigenschaften implementiert ist, für die Anwendung im automotive Bereich zu präsentieren. Eine Realisierung dieses Verfahrens nutzt den Einsatz einer modulierten Beleuchtung.

Das Prinzip des Lichtschnittverfahrens basiert auf einer Projektion des Lichtstreifens auf das zu vermessende Objekt, von dem der Lichtstreifen auf den Sensor reflektiert wird. Eine geometrische Darstellung des Triangulationsprinzips ist in Abbildung 6.6 gezeigt. Wenn die Kamera entlang der  $z$ -Achse und die Lichtquelle in einer Entfernung  $b$  zur Kamera positioniert sind, läßt sich unter Berücksichtigung der Projektionswinkel  $\alpha$  und  $\beta$ , die die Ausrichtung der Lichtquelle zu der  $x$ - bzw.  $y$ -Achse beschreiben, eine Entfernung des Punktes  $P_o(x, y, z)$  eines Objekts  $O$  im Koordinatensystem  $K^O$  bezogen auf die mit dem Sensor gemessenen digitalen Werte  $P_s(u, v)$  (in Sensorkoordinatensystem  $K^S$ ) als

$$(x, y, z)^T = \frac{-b \tan \alpha}{u \tan \alpha + v \tan \beta - f} (u, v, f)^T \quad (6.1)$$

---

<sup>1</sup>Diese Anwendung ist aufgrund der geometrischen Tiefenbestimmung auch als Triangulation in der Literatur zu finden [106].



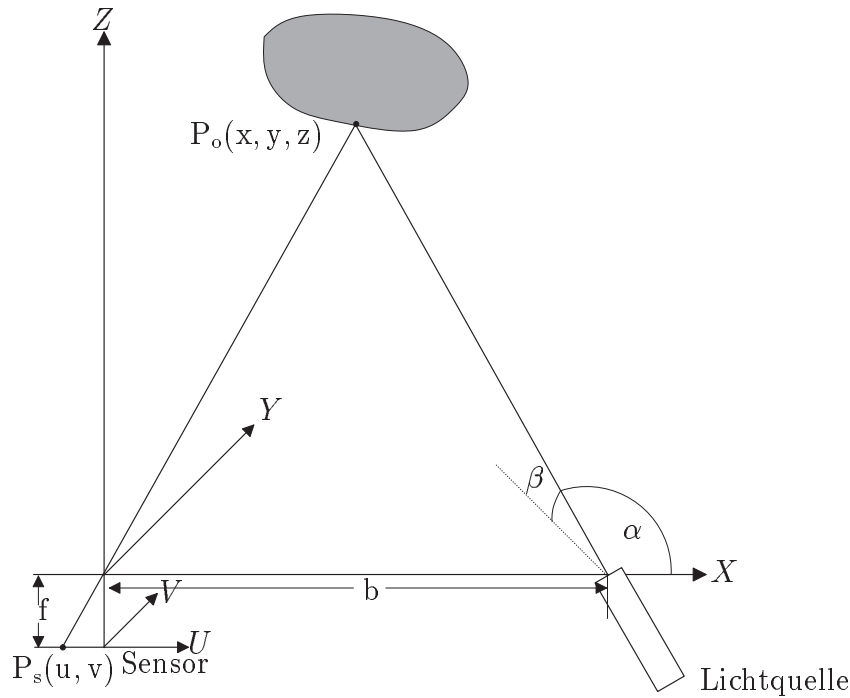


Abbildung 6.6: Geometrische Darstellung des Triangulationsverfahrens.

mit  $f$  als Brennweite der eingesetzten Linse berechnen. Unter Einbeziehung der erwähnten geometrischen Abstände und Winkel werden die mit dem Sensor akquirierten und anschließend digitalisierten Daten für eine 1D-Tiefeninformation gemäß dieser Gleichung ermittelt.

Die Ausnutzung der kurzen Integrationszeiten bzw. der hohen Bildraten bei der Datenakquisition mit Hilfe eines entwickelten Hochgeschwindigkeits-CMOS-Bildsensors ermöglicht eine schnelle Ermittlung der Abstandswerte vom gemessenen Objekt. Um die Einflüsse der parasitären externen Beleuchtung zu unterdrücken, wird der notwendige Lichtschnitt mittels eines Lasers erzeugt (das Laserlicht wird in eine Linie aufgeweitet), der mit einer Frequenz gepulst ist, die der Hälfte der Bildrate entspricht. Dies hat zur Folge, daß jedes zweite mit dem Sensor gewonnene Bild einen projizierten und vom Objekt reflektierten Lichtschnitt erfährt. Von jedem einzelnen Bild wird das nächst folgende, ohne Laserstreifen aufgenommene Bild substrahiert. Der daraus resultierende gepulste Betrieb (Einsatz mit modulierter Beleuchtung) gewährleistet mit dem eingesetzten CMOS-Bildsensor eine sehr effektive Unterdrückung des Hintergrundrauschens, das aufgrund der Änderungen der Beleuchtungsverhältnisse innerhalb der Szene, der Einflüsse des Fremdlichtes oder von sich schnell bewegenden Objekten entsteht. Dieser gepulste Betrieb ist nur möglich aufgrund der Eigenschaften des CMOS-Bildsensors, bei hohen Bildraten und bei sehr kurzen Integrationszeiten, die mit dem synchronen elektronischen Shutter eingestellt werden, arbeiten zu können.

Ein Triangulationssystem mit dem schnellen CMOS-Bildsensor auf der Basis des Lichtschnittverfahrens muß einen zuverlässigen Betrieb bei der angestrebten Anwendung unter

extremen Beleuchtungsverhältnissen gewährleisten. Für Anwendungen in der Automobiltechnik reichen die Beleuchtungsverhältnisse der Umgebung von einer totalen Dunkelheit bis hin zu stark sonnigen Tagen. Um ein mit dem Laser bestrahltes Objekt unter dieser extremen Arbeitsumgebung detektieren zu können, muß zum einen unter Berücksichtigung der Reflexionseigenschaften des Objekts die Beziehung

$$\rho_{\text{klein}} E_{\text{Sonne}} + \rho_{\text{klein}} E_{\text{Laser}} > \rho_{\text{groß}} E_{\text{Sonne}} \quad (6.2)$$

eingehalten werden [107]. Dabei sind  $\rho_{\text{klein}}$  und  $\rho_{\text{groß}}$  der kleinste und der größte Reflexionsfaktor des zu vermessenden Objekts bzw.  $E_{\text{Sonne}}$  und  $E_{\text{Laser}}$  die Bestrahlungsstärke der Sonne und des eingesetzten Lasers. Damit die angegebene Beziehung eingehalten werden kann, ist bei der Auswahl des Lasers auf die spektrale Empfindlichkeit des Bildsensors und die Dämpfung der Sonne in der atmosphärischen Umgebung zu achten. Bei einer Wellenlänge des nah-infraroten Lasers von  $\lambda = 780 \text{ nm}$  weist Silizium eine hohe Empfindlichkeit, hingegen die atmosphärische Umgebung eine hohe Dämpfung des Sonnenlichtes auf [108]. Wird das Rauschen des Sensors in Gleichung (6.2) berücksichtigt, ergibt sich die Beziehung, die bei sehr schwacher Umgebungsbeleuchtung ( $E_{\text{Sonne}} = 0$ ) eingehalten werden muß, zu

$$\rho_{\text{klein}} E_{\text{Laser}} > NEP_{\text{Sensor}} \quad (6.3)$$

wobei  $NEP_{\text{Sensor}}$  eine minimale äquivalente Bestrahlungsstärke<sup>2</sup> darstellt, die der Sensor nicht mehr als Rauschen detektiert.

Ein System zur optischen Sitzüberwachung für die Airbagsteuerung auf Basis des Lichtschnittverfahrens ist mit dem entwickelten CMOS-Bildsensor realisiert worden [97]. Diese Airbagsteuerung sieht eine reduzierte Zündung oder eine vollständige Abschaltung des Airbags für den Fall vor, daß sich eine Person zu nah am Armaturenbrett befindet oder ein Kindersitz installiert ist.

Die zuvor erwähnten Vorteile des Systems auf Basis der schnellen CMOS-Bildsensoren für Smart-Airbag-Lösungen stellen eine Überlegenheit gegenüber alternativen Lösungen dar [109]. Dies gilt insbesondere aufgrund der effizienten Handhabung der extremen Beleuchtungsunterschiede im Kraftfahrzeug bei einer schnellen Ermittlung der relevanten Informationen. Die CMOS-Bildsensoren ermöglichen zudem aufgrund einer schnellen Bildakquisition bei sehr kurzen Integrationszeiten unter Beibehaltung der Beziehung aus Gleichung (6.2) den Einsatz von starken Laserpulsen, ohne auf die Insassen gesundheitsschädlich zu wirken, d.h. aufgrund der geringen emittierten Energie die Einhaltung der Strahlungssicherheit von Laserstrahlen [110]. Dieser Vorteil des CMOS-Bildsensors kann durch die folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$E_{\text{Laser}} A_D \tau \leq \mathcal{E}_{\text{max}}, \quad (6.4)$$

---

<sup>2</sup>Oft wird NEP als eine minimale äquivalente Leistung bei einer gegebenen Sensorfläche  $A_D$  definiert.

wobei  $\mathcal{E}_{max}$  die maximal zugelassene Energie bezüglich des erwähnten Augenschutzes und  $E_{Laser}$  die Bestrahlungsstärke des Lasers ist, der auf die Fläche  $A_D$  mit der Pulsdauer  $\tau$  angewendet wird. Da der CMOS-Bildsensor in der Lage ist, Bilder bei sehr kurzen Integrationszeiten  $T_{int}$  aufzunehmen (bei dieser Anwendung ist der untere Mikrosekundenbereich von Interesse), ist es für  $T_{int} = \tau$  möglich, ohne die maximal zugelassene Energie  $\mathcal{E}_{max}$  zu überschreiten die Bestrahlungsstärke des Lasers  $E_{Laser}$  zu erhöhen. Zudem ist es gleichzeitig möglich, die auflösbaren Intensitätsunterschiede eines aufgenommenen Bildes für die Anwendung in konventionellen Analyseverfahren, der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung auszuwerten.

Abbildung 6.7 zeigt einen Beifahrersitz mit einer Person in verschiedenen Situationen mit dem dazugehörigen ermittelten Laserstreifen, der eine Information über den Abstand von einem Lichtschnittsensor, der mit dem im Kapitel 5.1 beschriebenen Bildsensor aufgebaut wurde, enthält. Die Integrationszeit betrug in diesem Fall 2 ms bzw. die Bildrate 50 Bilder/s.

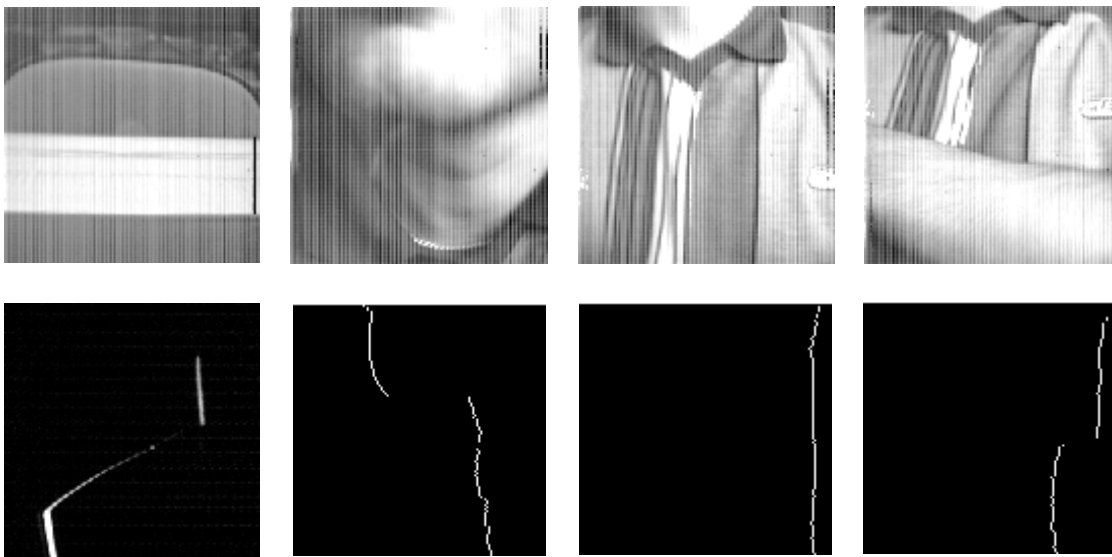


Abbildung 6.7: Die mit dem  $128 \times 128$  CMOS-Bildsensor (als Lichtschnittsensor) aufgenommenen Bilder des Beifahrersitzes in einem Kfz mit einer Person in verschiedenen Positionen und die dazu gehörige ermittelte Information über den Abstand von dem Sensor.

### 6.3.2 Laufzeitbasierte Abstandmessung

Die Laufzeitmessung stellt ein Verfahren dar, bei dem gesendete Mikrowellen-, Ultraschall- oder Laser-Signale von einem Objekt reflektiert werden und aufgrund ihrer endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit über den zu bestreitenden Weg Zeitverzögerungen verursachen. Aus diesen Zeitverzögerungen kann abhängig vom eingesetzten Verfahren der Laufzeitmes-

sung die Information über den Abstand zum Objekt direkt oder aus der entstehenden Phasen- oder Frequenzdifferenz der gesendeten und der empfangenen Signale zurückgewonnen werden, so daß man entsprechend zwischen dem direkten Verfahren, Amplituden- und Frequenzmodulationsverfahren unterscheidet [111]. Allen Verfahren liegt dabei die folgende Radar-Beziehung zugrunde

$$v \tau = 2 R, \quad (6.5)$$

wobei  $v$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der gesendeten Welle,  $\tau$  die entstandene Laufzeit und  $R$  die zu bestreitende Distanz zwischen Sender bzw. Empfänger und Objekt sind. Für das sehr häufig verwendete Amplitudenmodulationsverfahren errechnet sich der gemessene Abstand  $R$  indirekt aus der Phasenverschiebung des empfangenen modulierten Lichtsignals  $\Delta\varphi$  (in [rad]) bezogen auf das gesendete Lichtsignal gemäß [111] zu

$$R = \frac{c \Delta\varphi}{4 \pi f_{AM}}, \quad (6.6)$$

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $f_{AM}$  die Frequenz des sinusförmig (oder rechteckförmig) modulierten Lichtes darstellen.

Unter der hohen Anzahl der verschiedenen Realisierungen des Verfahrens für die Laufzeitmessung wird in dieser Arbeit ein Überblick nur über die bemerkenswertesten Lösungen mit integrierten Bildsensoren gegeben. Eine detaillierte Beschreibung dieser Verfahren mit den integrierten Bildsensoren, mit denen eine 2D-Tiefeninformation gewonnen werden kann, soll ihre Vor- und Nachteile aufzeigen, die für ein besseres Verständnis für den Einsatz von entwickelten und zukünftigen CMOS-Bildsensoren schaffen sollen. Große Aufmerksamkeit wecken unter anderem zwei Lösungen, die speziell gefertigte CCD-Sensoren verwenden [112, 113]. Dabei implementieren die beiden Lösungen innerhalb der speziell für diesen Zweck entworfenen Pixel eine Ladungssignalverarbeitung im Zeitbereich.

Der Lösung nach [112] liegt eine Modulation des Laserlichtes zugrunde, bei dem die Phasenverschiebung zwischen den empfangenen und den gesendeten Laserpulsen in Form einer Ladung ermittelt wird. Ein dafür modifizierter CCD-Sensor setzt eine Pixelstruktur voraus, die eine spiegelsymmetrische Anordnung mit dem Photogate in der Mitte besitzt (siehe Abbildung 6.8). Die Modulations-Steuerspannung steuert auf jeweils einer Seite der erwähnten Anordnung ein Modulationsgate (MG1 bzw. MG2) mit der gleichen Modulationsfrequenz, mit der das gesendete Licht auch moduliert wird. Aufgrund der Lichtlaufzeit, die eine Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  der empfangenen, bezogen auf die gesendeten Lichtpulse auslöst, werden während der ersten Integrationsphase (IP1) und der zweiten Integrationsphase (IP2) entsprechend unterschiedliche Photoladungen ( $Q_{PL1}$  bzw.  $Q_{PL2}$ ) integriert und anschließend unter dem Speichergate SG1 und dem Speichergate SG2 abgespeichert. Dadurch ist die Information über die Phasenverschiebung in jeweils einem Teil der generierten Photoladung,

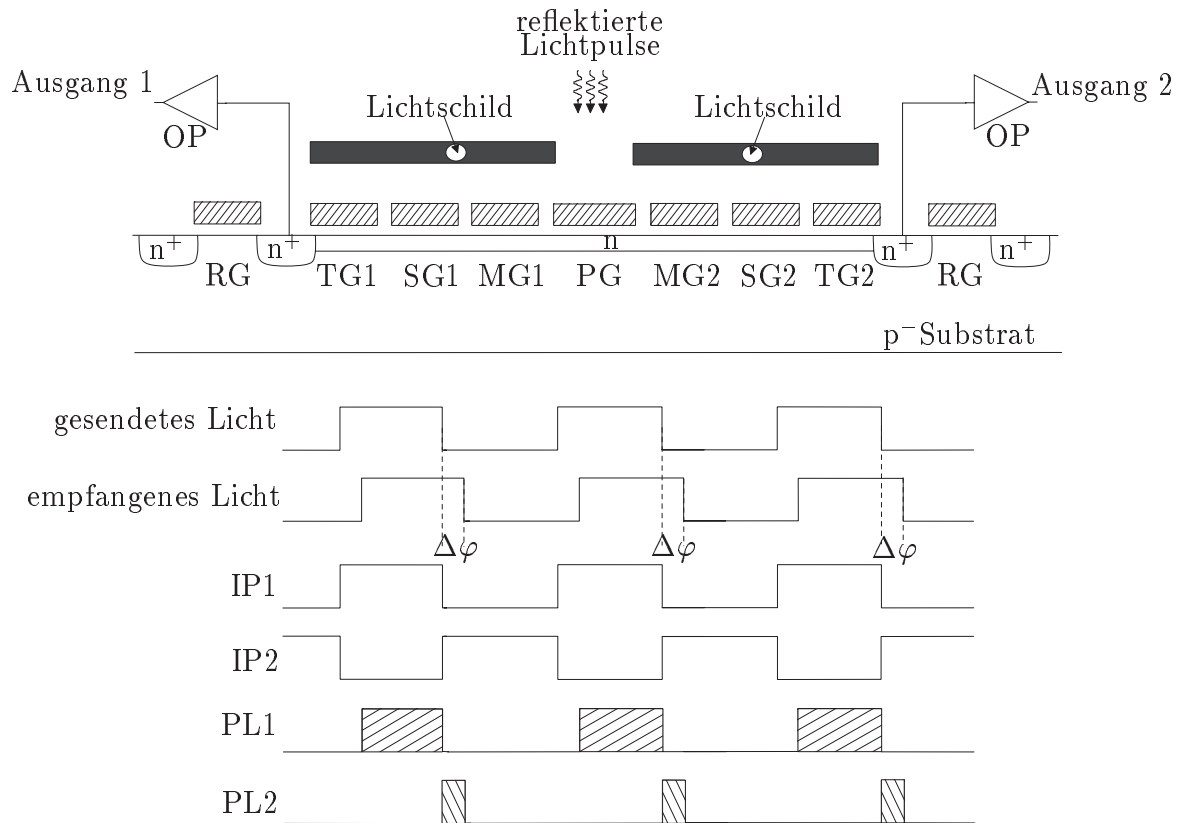


Abbildung 6.8: CCD-Pixelstruktur für die Laufzeitmessung nach [112].

die sich unter dem ersten bzw. dem zweiten Speichergate gesammelt hat durch ihre Differenz bestimmt. Wenn alle parasitären Ladungen sowie Ladungsverluste vernachlässigt werden, ergibt sich ein Abstandswert von

$$R = \frac{1}{4} c T_w \left| \frac{Q_{PL1} - Q_{PL2}}{Q_{PL1} + Q_{PL2}} \right|, \quad (6.7)$$

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $T_w$  die Pulsbreite des modulierten Lichtes und  $Q_{PL1}$  bzw.  $Q_{PL2}$  die generierten und unter den beiden Speichergates abgespeicherten Photoladungen sind. Diese Pixelstruktur ermöglicht eine Messung von mehreren Perioden des verwendeten Lichtes, um mehr Signalladung unter den beiden Speichergates aufzusammeln und dadurch die Messgenauigkeit zu erhöhen [105]. Nach der durchgeführten mehrfachen Integration werden die Photoladungen  $Q_{PL1}$  und  $Q_{PL2}$  über die Transfer gates  $TG1$  und  $TG2$  zu den Ausleseknöten transferiert, die vor der Auslese über Reset gates (RG) zurückgesetzt werden. Einen Nachteil dieser Methode stellt eine Mehrdeutigkeit der Messungen dar, die für das Amplitudenmodulationsverfahren ein Problem ist. Für diesen Fall tritt die Mehrdeutigkeit aufgrund der Periodizität der gemessenen Phase für Abstände größer als  $c T_w / 2$  auf, was einem Phasenbereich von  $180^\circ$  entspricht. Das Problem könnte nur mit dem Einsatz bestimmter

Bitmuster des verwendeten Lichtes anstatt von einfachen Pulsen aufgehoben werden. Ein weiterer Nachteil dieses mit 10 MHz modulierenden Verfahrens bei einem Meßbereich von 10 bis 150 cm liegt in einer sehr langsamen Meßmethode. Die in [112] angegebene Meßzeit von 1.06 s ist notwendig, um aufgrund der geringen Sensorempfindlichkeit mehrfache Integrationen durchführen zu können. Zudem leidet der CCD-Sensor aufgrund der resultierenden langen Integrationsvorgänge unter erhöhtem Dunkelstromrauschen.

Eine andere bemerkenswerte Lösung wurde mit einem CCD-Sensor in zwei geringfügig verschiedenen Varianten in [113, 114] vorgestellt. Der CCD-Sensor ist in der Lage, ein modulierte Licht zu detektieren, indem innerhalb einer Periode des sinusförmig modulierten Lichtsignals mehrere Integrationen von Photoladungen paketförmig durchgeführt werden. Wenn die Anzahl solcher Pakete (Abtastwerte innerhalb einer Periode des Lichtsignals) reicht, um das Nyquistkriterium zu erfüllen, können die Phase  $\varphi_P$  und die Amplitude  $A_{m,P}$  der Bestrahlungsstärke des Lichtes bezogen auf die Zeit  $t$ , d.h.  $P = E_{light}/t$ , die den integrierten Ladungspaketen direkt proportional ist, in Form der Fourier-Koeffizienten wie folgt

$$\varphi_P = \arctan \left[ -\frac{\sum_{k=0}^{N-1} P_k \sin \left( \frac{2\pi k}{N} \right)}{\sum_{k=0}^{N-1} P_k \cos \left( \frac{2\pi k}{N} \right)} \right] \quad (6.8)$$

$$A_{m,P} = \frac{1}{N} \sqrt{\left[ \sum_{k=0}^{N-1} P_k \cos \left( \frac{2\pi k}{N} \right) \right]^2 + \left[ \sum_{k=0}^{N-1} P_k \sin \left( \frac{2\pi k}{N} \right) \right]^2}$$

berechnet werden [113], wobei  $P_k$  die Abtastwerte bzw.  $N$  die Anzahl der gewonnenen Pakete sind. Der Abstand zu dem zu vermessenden Objekt wird mit dem Einsatz der ermittelten Phase  $\varphi_P$  in die Gleichung (6.6) gewonnen werden. Wenn der gleiche CCD-Sensor anstatt für eine Laufzeitabstandsmessung für eine interferometrische Phasenmessung verwendet wird, kann der Abstand ohne (für eine phasenmodulierte Laufzeitmessung typische) Mehrdeutigkeiten ermittelt werden [115]. Eine in [113] vorgeschlagene Pixelstruktur ist in Abbildung 6.9 gezeigt.

Das Pixel verfügt über ein Photogate, ein Resetgate, ein Transfergate und zwei Vier-Phasen-Schieberegister, nämlich ein Pipeline- und ein Speicher-/Ausleseregister. Die eigentliche Photointegration findet unter dem Photogate statt, deren Dauer mit dem Resetgate über die Ladungsabfuhr in das Resetdiffusionsgebiet geregelt wird. Nachdem die Integration eines Pakets abgeschlossen ist, werden die Photoladungen über das Offset-Korrekturgate in das Pipelineregister transferiert. Dabei wird der Gleichanteil aus dem Lichtsignal beseitigt. Anschließend folgt die Integration des nächsten Pakets bzw. ein Transfer der dabei generierten Ladungen in das Pipelineschieberegister. Der zuvor ermittelte Wert verschiebt sich in die nächste Zelle des Pipelineschieberegisters. Die Tiefe bzw. die Anzahl der Zellen des Pipelineschieberegisters bestimmt die Anzahl der Pakete, die über eine Lichtperiode  $T_0$  ermit-

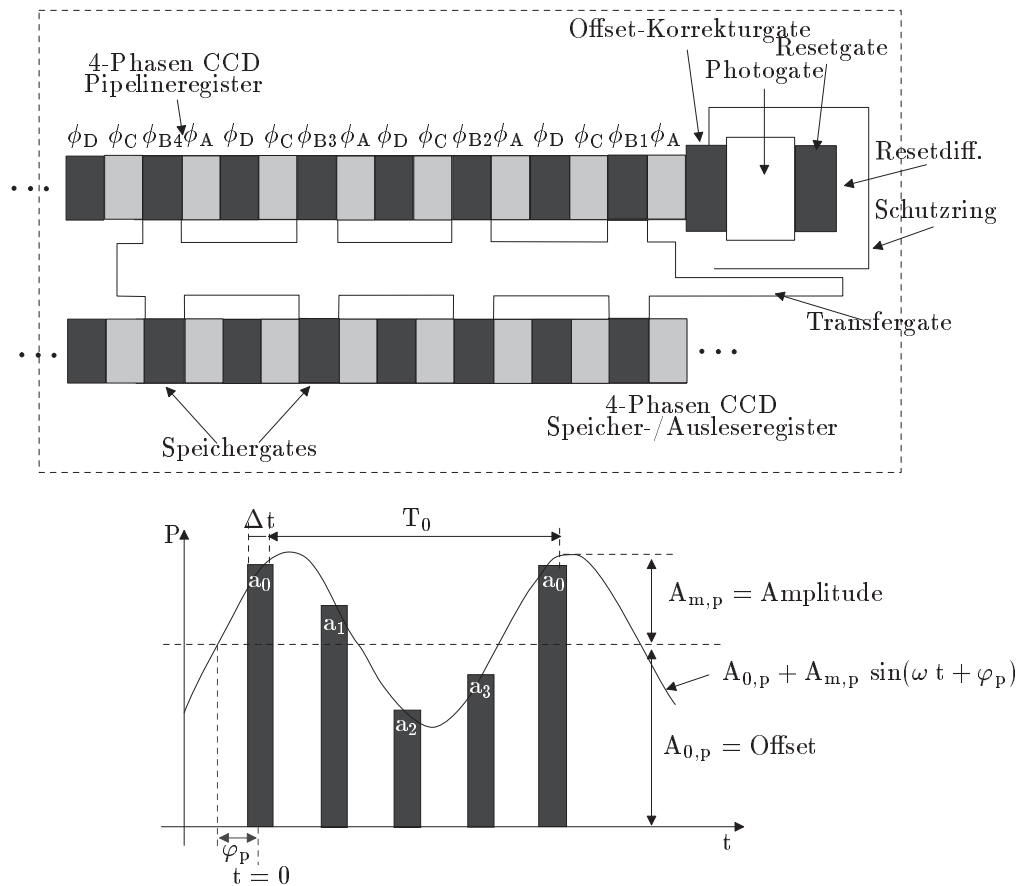


Abbildung 6.9: Struktur des CCD-Pixels für die Laufzeitmessung aus [112] mit dem zugehörigen Messprinzip.

telt werden (in Abbildung 6.9 gibt es vier Zellen). Nachdem alle Pakete einer Lichtperiode gewonnen sind und entsprechend in die zugehörige Zelle des Schieberegisters transferiert sind, werden die zugehörigen Photoladungen über das Transfergate parallel in das Speicher-/Ausleseregister geschoben. Um die Genauigkeit der beschriebenen Methode zu erhöhen, werden die ermittelten Werte in dem Speicher-/Ausleseregister so lange gehalten, bis eine gewisse Anzahl  $N$  von Integrationen durchgeführt ist, so daß die aufakkumulierten Photoladungen ein bestimmtes Niveau erreicht haben. Erst dann erfolgt eine Auslese der aufakkumulierten Ladungen. Die ausgelesenen Werte werden digitalisiert, so daß die offset-freie Amplitude und Phase aus den zugehörigen Fourier-Koeffizienten des Lichtsignals ermittelt werden können. Damit kann eine eindeutige Abstandsmessung gewährleistet werden. Der Nachteil dieser Lösung liegt in einer sehr aufwendigen Pixelstruktur mit sehr kleinem Füll-Faktor.

Eine interessante Implementierung der Abstandsmessung auf Basis des Amplitudenmodulationsverfahrens ist mit dem Einsatz eines CMOS-Bildsensors in [116] präsentiert. Das als speziell gefertigter photoempfindlicher Photomischdetektor (4-Quadranten-PMD) verwen-





Kapazitäten aufintegriert. Dabei liefert die Ausleseschaltung am Ausgang zum einen eine Summenspannung  $\sum U_{AB}$ , die als Ergebnis eine Pixelhelligkeit darstellt. Zum anderen und im Unterschied zu [112], wo die Information über die Phase in einer Spannungsdifferenz am Ausgang direkt von den integrierten Ladungen stammt, trägt bei diesem Verfahren eine Differenz der Photoströme zu der informationsbeinhaltenden Differenzspannung  $\Delta U_{AB}$  am Ausgang bei. Die Ausgangsspannungen können wie folgt

$$\sum U_{AB} = (\overline{i_{A,0^\circ}} + \overline{i_{B,0^\circ}}) \frac{T_{int}}{C_0} \quad (6.9)$$

$$\Delta U_{AB,0^\circ} = (\overline{i_{A,0^\circ}} - \overline{i_{B,0^\circ}}) \frac{T_{int}}{C} = \left( K \int_0^{T_{int}} P_{opt}(x, y, t - \tau) u_m(t) dt \right) \frac{T_{int}}{C}, \quad (6.10)$$

geschrieben werden, wobei bei diesem Verfahren eine Korrelation des modulierten Lichtes  $P_{opt}(x, y, t - \tau)$  und der Modulationsspannung  $u_m$  in der Differenz der Ströme  $\overline{i_{A,0^\circ}} - \overline{i_{B,0^\circ}}$  enthalten ist. Für die Bestimmung des gemessenen Abstands ist bei diesem Amplitudenmodulationsverfahren die Phasenabhängigkeit des empfangenen Lichtes für einen Phasenbereich von  $360^\circ$  (in [112] war dieser Bereich  $180^\circ$ ) aus mindestens drei Werten der ermittelten Ströme zu gewinnen. Der in Abbildung 6.10 mit seinem Querschnitt präsentierte 2D-Quadranten-Mischer liefert aufgrund der Gegentaktmischung (an den Elektroden  $G_{mA,0^\circ}$  und  $G_{mB,0^\circ}$ ) zwei Werte. Die übrigen zwei Werte liefert der andere senkrecht ausgerichtete 2D-Quadranten-Mischer, der mit den erwähnten, um  $90^\circ$  Grad phasenverschobenen Modulationsspannungen (an den Elektroden  $G_{mA,90^\circ}$  und  $G_{mB,90^\circ}$ ) angesteuert ist. Daher errechnet sich die Phase als

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\overline{i_{A,90^\circ}} - \overline{i_{B,90^\circ}}}{\overline{i_{A,0^\circ}} - \overline{i_{B,0^\circ}}} \right) = \arctan \left( \frac{\Delta U_{AB,90^\circ}}{\Delta U_{AB,0^\circ}} \right). \quad (6.11)$$

Um den Nachteil der Mehrdeutigkeit zu umgehen, wird das Licht mit einem bestimmten Bitmuster modelliert. Das Meßverfahren umfaßt Entfernungen von 20 cm bis 50 m bei einer Tiefenauflösung von 0.5 bis 50 mm. Ein großer Nachteil dieser Methode ist eine starke Beanspruchung der CMOS-Ausleseelektronik bezüglich ihrer notwendigen Bandbreite, da die generierten Photoströme dauernd ausgelesen werden müssen. Zudem beansprucht ein Pixel zwei Ausleseschaltungen, was zu einem geringen Füllfaktor führt.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten CMOS-Bildsensoren eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften für eine direkte Laufzeitmessung mit gepulstem Laser. Dabei befinden sich die angestrebten Anwendungen dort, wo eine Tiefengenaugigkeit von einigen Metern mit einer Auflösung bis in den cm-Bereich notwendig wäre.

Neben einer schnellen Auslese ist bei den entwickelten CMOS-Bildsensoren für eine Implementierung von Laufzeitmessungen die Realisierung eines synchronen elektronischen Shut-

ters von essentieller Bedeutung, der in der Lage ist, variable Integrationszeiten bis in den Nanosekundenbereich zu gewährleisten, um Laufzeitunterschiede auflösen zu können. Um eine Entfernungsmessung zum gewünschten Objekt durchzuführen, sind jeweils zwei Messungen bei gleich langen Laserpulsen erforderlich. Bei der ersten Messung, die einer längeren Integrationsdauer entspricht, wird mit dem elektronischen Shutter der reflektierte Laserpuls abhängig von der Entfernung von dem Objekt nur teilweise aufintegriert. Dabei muß dafür gesorgt werden, daß in keinem Fall der ganze Puls erfaßt wird, sondern daß er im Gegenteil an seinem Ende immer abgeschnitten bleibt. Ähnlich wird bei der zweiten Messung bei einem gleich langen Laserpuls eine kürzere Integrationszeit gewählt, so daß der reflektierte Laserpuls entsprechend kürzer integriert wird. Da es aufgrund der hohen Bildrate zwischen beiden Messungen zu keiner Objektbewegung kommen kann, befindet sich die Information über den Abstand in der gemessenen Zeitverzögerung  $T_0$ , die gemäß der zwei durchgeführten Messungen und den dabei ermittelten Signalwerten wie folgt berechnet werden kann:

$$T_0 = \frac{T_{ms2} U_{ms1} - T_{ms1} U_{ms2}}{U_{ms1} - U_{ms2}}. \quad (6.12)$$

Dabei sind  $T_{ms1}$  und  $T_{ms2}$  die Integrationsdauer der längeren bzw. kürzeren Messung und  $U_{ms1}$  und  $U_{ms2}$  die Spannungen der jeweils durchgeführten Integration. Die Sensor- und Laseransteuerung ist in Abbildung 6.11 für eine der beiden Messungen gezeigt.

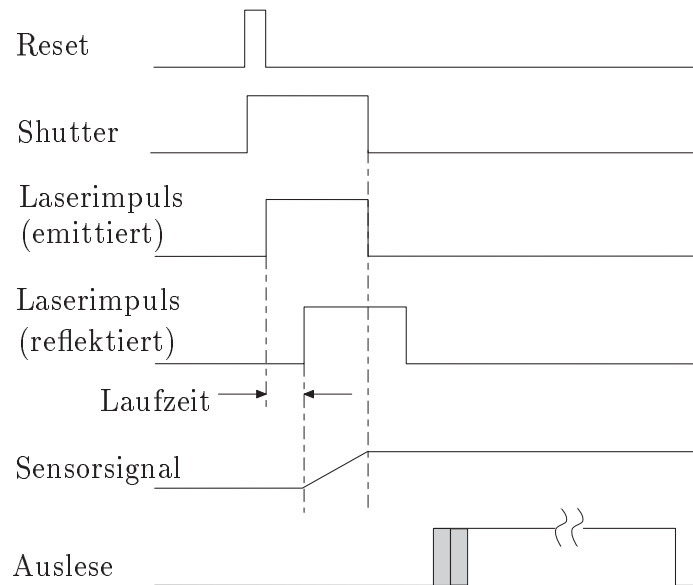


Abbildung 6.11: Das Zeitdiagramm einer der beiden Messungen für die mit  $128 \times 128$  Pixel CMOS-Sensor realisierte direkte Laufzeitabstandsmessung.

Die Stärke dieses direkten Verfahrens besteht darin, daß keine sehr schnelle Ausleseelektronik (mit der Bandbreite im oberen MHz- oder GHz-Bereich) benötigt wird, sondern daß

gerade die realisierbaren kurzen Integrationszeiten und anschließend eine Speicherung der akquirierten Ladungen für die Funktionalität des Sensors entscheidend sind. Dabei muß nicht auf die genaue Länge der gesendeten Laserpulse und ihre exakte Lage zum Beginn der Integrationszeit geachtet werden. Im Gegenteil ist nur auf eine Reproduzierbarkeit der Signallagen (aus Abbildung 6.11) zu achten, d.h. ein möglichst kleines Jitter ist angestrebt. Somit wird der Teil des reflektierten Laserpulses, der durch die Laufzeit verzögert auf den Bildsensor ankommt, einfach durch das Öffnen des elektronischen Shutters unwirksam gemacht.

Für die Realisierung dieses Laufzeitverfahrens sind zwei unterschiedlich lange Integrationszeiten, nämlich von 60 ns und 30 ns verwendet worden. Unter dem Aspekt der Funktionalität in einer Umgebung mit extremen Beleuchtungsverhältnissen ist unter Berücksichtigung der Beziehung aus Gleichung (6.2) ein 100 W-Laser mit einer Wellenlänge im nicht sichtbarem Nah-Infrarotbereich von  $\lambda \approx 850$  nm verwendet worden. Ähnlich wie bei allen vorgestellten Realisierungen in [112–114, 116] sind bei den durchgeführten optischen Messungen mehrfache Integrationen durchgeführt worden, um die Meßgenauigkeit zu erhöhen [105]. Die mehrfache Integration ermöglicht eine Mittelung der akquirierten Daten, so daß nach einem  $N$ -mal wiederholten Vorgang das Rauschen um Faktor  $\sqrt{N}$  verringert wird und die daraus folgende Meßgenauigkeit größer wird. Zudem folgt aus einem geringeren Rauschen ein ebenso geringeres NEP des Sensors, was gemäß Gleichung (6.3) die einzusetzende Laserleistung senkt.

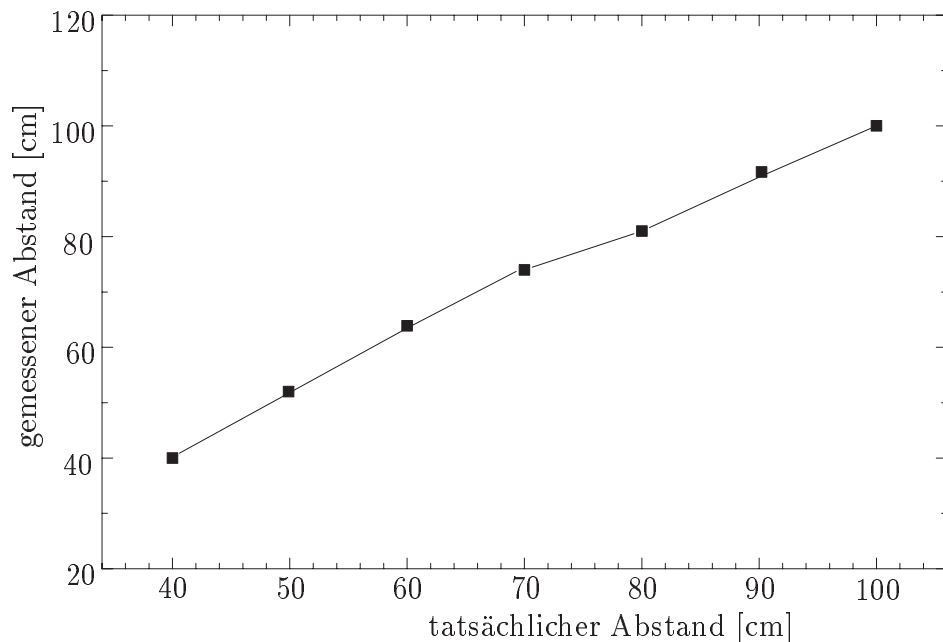


Abbildung 6.12: Der mit dem Laufzeitverfahren gemessene Abstand vs. tatsächlichem Abstand.

Eine mit dem vorgestellten und realisierten direkten Laufzeitverfahren gemessene Entfernung zum betrachteten Objekt (zum Test wurde ein Blatt Papier verwendet) ist in Abbildung 6.12 gezeigt. Bei einer Anzahl von 20 Mittelungen betrug die Meßzeit 40 ms.

Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Mittelungen (oder der mehrfachen Integrationen) und der Meßdauer ist direkt verknüpft mit der Art der durchgeführten Mittelungen. Bei dem implementierten Laufzeitverfahren mit dem verwendeten CMOS-Bildsensor ist eine Mittelung zur Erhöhung der Meßgenauigkeit nach der Auslese und nach der Digitalisierung der gewonnenen Daten durch ihre Summation realisiert worden. Da eine Messung bei dieser Art der Mittelung erst nach der durchgeführten Auslese der Signale aus der photoempfindlichen Matrix erfolgt, erhöht sich automatisch die Meßdauer um den Faktor  $2 T_{Bild} (N - 1)$ . Eine Verkürzung der Meßdauer, d.h. eine Erhöhung der Meßgeschwindigkeit wäre möglich, wenn die Mittelung (oder eine mehrfache Integration) vor der Auslese der Daten analog On-Chip erfolgen würde. Da die Standard-CMOS-Technik eine Vielfalt von unterschiedlichen Lösungen für diverse Signalverarbeitung ermöglicht, ist eine Implementierung eines analogen Mittelungsverfahrens (d.h. einer mehrfachen Integration) mit CMOS-Bildsensoren denkbar.

Eine solche Lösung wäre bei der Verwendung einer im vierten Kapitel vorgestellten Pixelstruktur und Ausleseschaltung aus Abbildung 5.13 ohne S/H-Stufe möglich. Der Unterschied wäre dabei, daß die Ausleseschaltung nicht mehr spaltenorientiert, sondern selbst der Bestandteil des Pixels wäre. Da bei den angestrebten Anwendungen oft deutlich kleinere Auflösungen ausreichen, werden die Pixel aufgrund des gewünschten geringeren Rauschens mit sehr großflächigen Photodioden realisiert. (Eine großflächige Photodiode hat aufgrund ihrer resultierenden großen Kapazität ein geringeres  $kTC$ -Rauschen.) Zudem wäre bei einer großflächigen Photodiode eine Realisierung von aktiven Bauelementen im Pixel, d.h. eines treiberfähigen Source-Folgers sowie der ganzen Ausleseschaltung, ohne große Einbuße bezüglich des angestrebten hohen Füll-Faktors zu verzeichnen. Da die Ausleseschaltung ein Bestandteil des Pixels ist, wird der Selekttransistor  $M4$  an dessen Ausgang verlegt. Die Shutterfunktion wäre dann entweder mit dem Transistor  $M2$  oder mit dem in Kapitel 5.2.2 verwendeten Selekttransistor  $M4$  realisiert. Abbildung 6.13 zeigt ein solches Pixel inklusive der Ansteuerung, die sich unter Verwendung des in Abbildung 6.11 vorgestellten Prinzips nur geringfügig von demjenigen unterscheidet, das für den vorgestellten  $256 \times 256$  Pixel CMOS-Bildsensor verwendet wurde.

Entscheidend für die Realisierung einer analogen Mittelung ist eine Entkopplung der Ansteuerung für die Schalter  $S1$  und  $S3$ . Nur bei der ersten Integration werden die beiden Schalter gleichzeitig geschlossen, um den Inhalt des in dieser Konstellation für die Akkumulation der Daten verantwortlichen Kondensators  $C_F$  zurückzusetzen und das Offset des Operationsverstärkers für die Ermittlung des nächsten Wertes wegzukalibrieren. Nach der abgeschlossenen Referenzmessung (entspricht der ersten „Signal“-Phase bei dem zweiten, im fünften Kapitel vorgestellten Bildsensor) und der Speicherung des integrierten Signal-

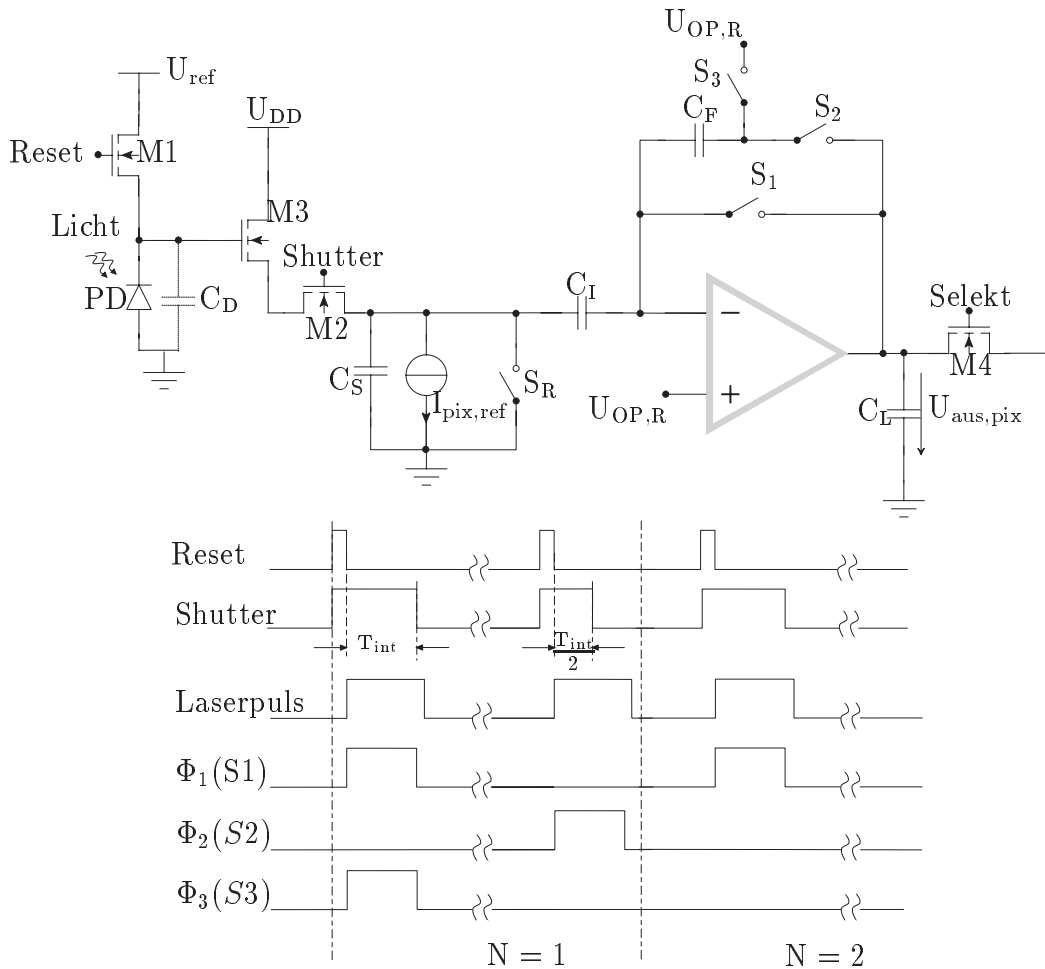


Abbildung 6.13: Die Pixelstruktur eines CMOS-Bildsensors für die Laufzeitmessung mit On-Chip analoger Mittelung.

wertes auf dem Kondensator  $C_I$  erfolgt die tatsächliche Messung (entspricht der zweiten „Reset“-Phase des realisierten CMOS-Bildsensors) und eine Abspeicherung der ermittelten Spannung am Kondensator  $C_F$ . Bis zu diesem Zeitpunkt ist der Auslesevorgang identisch mit demjenigen, der bei dem vorgestellten  $256 \times 256$  Pixel CMOS-Bildsensor verwendet wurde. Der Unterschied entsteht bei den weiteren Integrationsvorgängen ( $N = 2, 3, \dots$ ), da nur der Schalter  $S1$  geschlossen wird, während beim durchgehend geöffneten Schalter  $S3$  der Kondensator  $C_F$  den zuvor durch Integration gewonnenen Spannungswert weiter behält. Dies ermöglicht, daß nach der zweiten Phase die neue ermittelte Differenz, aus der sich die Abstandsinformation ergibt, zu dem vorherigen Wert aufaddiert wird. Nach dem  $N$ -mal wiederholten beschriebenen Vorgang enthält der Kondensator  $C_F$  die aufaddierten Werte der durchgeführten  $N$  Messungen, die bei einem Schließen des Selekttransistors, d.h. beim Anwählen einer Zeile in Form einer Spannung ausgelesen werden. Mit dem beschriebenen Vorgang der mehrfachen Integration würde der durchgeführte Meßablauf nicht mehr von dem Auslesevorgang abhängen. Eine deutlich reduzierte Anzahl der digitalen Mittelungen

könnte zusätzlich durchgeführt werden.

Die präsentierte Realisierung sowie einen Vorschlag zu einer Verbesserung der direkten Laufzeitmessung beweist die zusätzlichen Möglichkeiten für den Einsatz von CMOS-Bildsensoren in der optischen Meßtechnik. Besonders interessante Einsatzgebiete liegen im Bereich der schnellen 3D-Vermessung, der Lagebestimmung, der Bewegungskontrolle, der Navigation, bei Sicherheitssystemen usw.

## 6.4 Überwachung mit schnellen Kurzzeitbelichtungssensoren

Ein weiteres interessantes Einsatzgebiet für die entwickelten CMOS-Bildsensoren stellen Überwachungsaufgaben dar, die das Ziel haben, bewegte Objekte unabhängig von der Textur, Geschwindigkeit oder Richtung zu detektieren. Typische Anwendungen sind z.B. Objektverfolgung, Roboternavigation, dynamische Überwachung von industriellen Prozessen oder Alarmsysteme.

Die implementierten und an die existierenden Kamerasysteme gekoppelten Algorithmen für diese Überwachungszwecke basieren aufgrund des geringeren Aufwandes der Signalverarbeitung meistens auf Referenzbildmethoden. Die Grundidee besteht dabei darin, ein aktuelles Eingangsbild mit dem Referenzbild zu vergleichen, um eine binäre Maske zu ermitteln, die für jedes Pixel die Zugehörigkeit zu einer Vordergrund- oder einer Hintergrundklasse anzeigt. Aus der Maske können für jedes Objekt die horizontale, vertikale und zeitliche Information ermittelt werden. Die einfachste Referenzbildmethode, bei der jedes ermittelte Bild von einem zeitunabhängigen Referenzbild abgezogen wird, ist für die meisten Anwendungen, aufgrund der falschen Vordergrunddetektion bei sich langsam bewegenden, stationären Objekten, nicht geeignet. Die Differenzbildmethode setzt dagegen eine Differenz zwischen dem aktuellen Bild und dem Referenzbild, das bei dieser Methode das letzte aktuelle Bild darstellt, voraus. Die Probleme dieser Methode, wie z.B. Objektränder statt zusammenhängende Regionen als Ergebnis der Vordergrundextraktion zu erhalten, sind mit den Lösungen in [117] mit vorgeschlagenen zeitrekursiven Methoden gelöst. Die zeitrekursiven Methoden nehmen eine unterschiedliche Gewichtung, d.h. eine Adaptation der Vorder- bzw. Hintergrundinformation vor, um schließlich eine vollständige Vordergrundinformation zu extrahieren. Zusätzlich dazu führt die Lösung in [118] eine Adaptation der Gewichtungskoeffizienten durch, die insgesamt eine schnellere Adaptation des Hintergrunds gewährleistet. Diese drei erwähnten und am FhG IMS entwickelten Algorithmen zeigen deutliche Vorteile gegenüber einer Kalman-Filtermethode, die sehr zeitintensiv ist und zusätzlich nur für prädiktive Prozesse geeignet ist [119]. Abbildung 6.14 zeigt einen Vergleich zwischen den verwendeten Algorithmen bezüglich der durchgeführten Vordergrundextraktion [118].

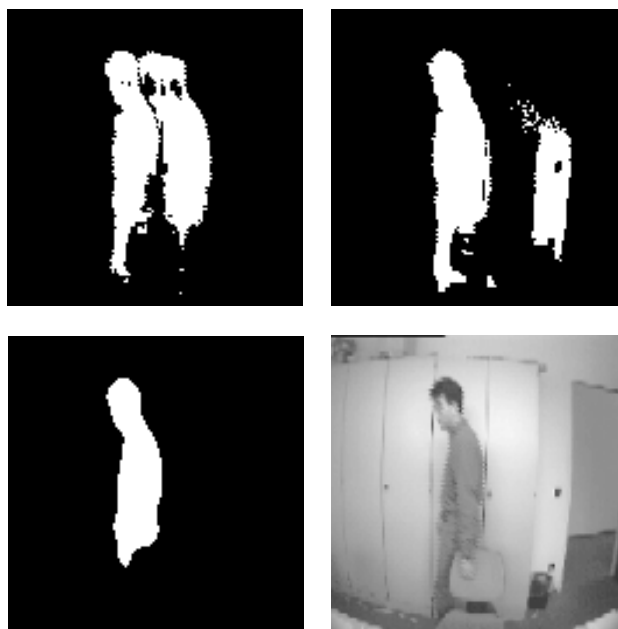


Abbildung 6.14: Vordergrundextraktion des relevanten Bereiches einer Bildsequenz, die mit einer gewöhnlichen CCD-Kamera aufgenommen wurde. a) zeitrekursive Filtermethode [117], b) Kalman-Filtermethode [119], c) adaptiv-zeitrekursive Filtermethode [118] d) Originalbild. Die Verwendung der Kamera mit dem schnellen CMOS-Bildsensor mit aktiver Beleuchtung gewährleistet die Ermittlung der verfälschungsfreien Vordergrundinformation (wie in c)), unabhängig von dem verwendeten Algorithmus.

Unabhängig von der Auswahl der erwähnten Methode sind die Eingangsinformationen von eminenter Bedeutung für eine effektive Funktionalität des jeweiligen Algorithmus. Ähnlich wie bei der aktiven Triangulation wird für jedes Eingangsbild eine Differenz zwischen einem mit einer Nah-Infraroten (für diesen Zweck allerdings diffusen) Beleuchtung ausgeleuchteten Szene aufgenommenen Bild und einem ohne Beleuchtung aufgenommenen Bild gebildet. Durch die Kombination eines optischen Tiefpaßfilters und der spektralen Empfindlichkeit des CMOS-Bildsensors entsteht ein optischer Bandpaß, der eine effiziente Unterdrückung des Hintergrundrauschens und der externen Beleuchtung gewährleistet. Erst nach der Ermittlung der informationsreichen und rauscharmen Eingangsbilder können die Vorteile der erwähnten drei Algorithmen ausgenutzt werden, indem die ermittelten binären Informationen für die weitere Bildverarbeitung wie z.B. Formmerkmalsextraktion, Klassifizierung usw. [101] mit einer hohen Effizienz unter extremen Umgebungsbedingungen vollständig ausgenutzt werden können.

Mit den entwickelten Hochgeschwindigkeits-CMOS-Bildsensoren lassen sich durch die Eigenschaften der sehr kurzen und variablen Integrationszeiten, die mit einem globalen synchronen Shutter realisiert sind, und durch hohe Bildraten, in einer Kombination mit der

gepulsten Beleuchtung informationsreiche und rauscharme Eingangsbilder ermitteln. Zudem können alle Verfälschungen, die als Folge einer sehr schnellen Bewegung entstehen, sehr gut unterdrückt werden. Dies bedeutet bei der Vordergrundextraktion eine effiziente Unterdrückung des Hintergrundrauschens, die für Eingangsdaten der beiden Algorithmen insbesondere unter extremen Umgebungsbeleuchtungen und unvorhersehbaren Objektbewegungen erforderlich ist. Durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeits-CMOS-Bildsensoren werden den zwei erwähnten Algorithmen bessere Eingangsbilder zur Verfügung gestellt, die frei von Mehrdeutigkeiten sind und somit eine gute Basis für weitere Bildverarbeitung in zahlreichen Überwachungsanwendungen darstellen.

## 6.5 Zusammenfassung

Im diesem Kapitel wurden verschiedene Anwendungen der entwickelten und im Kapitel 5 vorgestellten CMOS-Bildsensoren aufgezeigt, die auch über die angestrebten Anwendungen in der Hochgeschwindigkeitskinematographie hinaus reichen. Für die Aufzeichnung von schnell ablaufenden Ereignissen erfüllen diese CMOS-Bildsensoren alle relevanten Anforderungen. So ist anhand der präsentierten Bildsequenzen, die mit den beiden entwickelten CMOS-Bildsensoren aufgenommen wurden, bei einer sehr guten Bildqualität eine effiziente Unterdrückung der parasitären Effekte wie beispielsweise Verschmierungen, Smearing, Bloming dokumentiert worden. Neben dieser vergleichbar hochwertigen Bildqualität bieten CMOS-Bildsensoren für diese Anwendungen im Gegensatz zu den seit Jahren entwickelten CCD-Sensoren eine Reihe von zusätzlichen Vorteilen. So wird beispielsweise eine einfache und zuverlässige Realisierung eines On-Chip elektronischen synchronen Shutters, der neben einer Regelung der Integrationsdauer einen zuverlässigen globalen optischen Verschluss ermöglicht. Als Folge eines solchen Shutters reichen die minimalen Integrationszeiten vom unteren Mikrosekunden- bis hinab zum Nanosekundenbereich, wobei im Nanosekundenbereich der Sensor einen gepulsten Betrieb erfordert. Zudem wurde die Möglichkeit der Standard-CMOS-Technologie für die Realisierung der schaltungstechnischen Maßnahmen zur Rauschunterdrückung vollständig ausgenutzt. Für eine vergleichbare On-Chip Schaltungsrealisierung würden in der CCD-Technologie zusätzliche technologische Schritte benötigt, was ihre ohnehin große Technologiekomplexität weiterhin steigen lassen würde. Unter diesem wirtschaftlichen Aspekt kann sich ein entscheidendes Szenario für zukünftige Einsätze der CMOS-Bildsensorik in der Hochgeschwindigkeitskinematographie bilden.

Eine Möglichkeit, mit diesen CMOS-Bildsensoren bei Bildraten, die zwischen den TV-Bildraten und 1000 Bilder/s liegen, zuverlässig zu arbeiten und gleichzeitig gute Eigenschaften beizubehalten, bietet ihr Einsatz im Maschinellen Sehen. Da man eine Lücke bei Bildsensoren feststellen kann, die gerade bei diesen Bildraten funktionieren, eröffnet sich eine große Perspektive für den Einsatz von schnellen CMOS-Bildsensoren in einem Bildverarbei-



tungssystem, das im Zusammenhang mit den immer leistungsfähigeren und preiswerteren DSPs oder Mikroprozessoren für eine Weiterverarbeitung der akquirierten Bilddaten gebildet wird. Wenn noch dazu berücksichtigt wird, daß oft Realisierungen der Bildsensoren mit On-Chip Signalverarbeitung für eine Bildanalyse nicht ausreichen, können solche Bildverarbeitungssysteme zukünftig große Bedeutung im Bereich des Maschinellen Sehens haben.

Weitere wichtige Einsatzgebiete der entwickelten schnellen CMOS-Bildsensoren finden sich im Bereich der optischen Meßtechnik. Unter der Vielfalt der verschiedenen Verfahren wurden mit diesen CMOS-Bildsensoren jeweils eine Anwendung der Triangulations- und Laufzeitmethode realisiert und hier vorgestellt. In beiden Fällen wurde eine aktive Beleuchtung benutzt, um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter extremen Bedingungen, die mit diesen Anwendungen verknüpft sind, zu steigern. Bei dem präsentierten Lichtschnittverfahren wurden die Eigenschaften des CMOS-Bildsensors wie eine kurze Integrationszeit und eine schnelle Bildrate vollständig ausgenutzt. Bei einer aktiven Beleuchtung im gepulsten Betrieb ermöglichen die schnellen Bildraten eine sehr effiziente Unterdrückung des Hintergrundrauschens, das entweder auf Beleuchtungsunterschiede innerhalb der Szene oder auf eine unerwünschte schnelle Objektbewegung zurückzuführen ist. Zudem ermöglicht eine Bildakquisition bei kurzen Integrationszeiten eine Verwendung von Lichtpulsen mit hoher Leistung, was insgesamt zu einer nicht zu hohen ausgestrahlten Energie führt. Diese Zusammenhänge sind beispielsweise bei einer Airbagsteuerung von essentieller Bedeutung wegen der Einhaltung der Strahlungssicherheit von eingesetzten Laserstrahlen in Bezug auf die Augensicherheit der Kfz-Insassen.

Bevor mit dem CMOS-Bildsensor eine direkte Methode der laufzeitbasierten Abstandsmessung präsentiert wurde, ist ein Überblick über bemerkenswerte Lösungen mit Bildsensoren für die geometrische Raumerfassung vorgestellt worden. Zwei Lösungen in [112,113] mit den CCD-Sensoren haben gezeigt, daß es mit speziell entwickelten Pixelstrukturen möglich ist, ein moduliertes Licht örtlich zu detektieren. Aufgrund der speziell vorgesehenen Speicherstrukturen ist es gleichzeitig möglich, für eine höhere Genauigkeit eine mehrfache Integration durchzuführen. Die Lösung in [112] mit einer etwas einfacheren Pixelstruktur weist Nachteile aufgrund ihrer langen Meßdauer auf, die sowohl durch eine schlechte Empfindlichkeit (kleine Transparenz der eingesetzten Photogates) als auch durch eine langsame Auslese bedingt ist. Eine andere Lösung in [113] mit dem CCD-Sensor hebt eine Mehrdeutigkeit, typisch für die erste Lösung, auf, verfügt aber über sehr große und komplexe Pixel. Eine Lösung mit einem CMOS-Bildsensor in [116] verwendet im Vergleich zu den zuvor erwähnten Lösungen einfachere Pixel, aber beansprucht gleichzeitig sehr schnelle Ausleseschaltungen mit Bandbreiten im oberen MHz und GHz-Bereich, da die ermittelten Photoströme dauernd (bei einer Modulationsspannung von 1 GHz) ausgelesen werden. Die mit dem  $128 \times 128$  Pixel CMOS-Bildsensor realisierte direkte Methode zur laufzeitbasierten Abstandsmessung nutzt die Vorteile dieses Sensors, die Bilder bei Integrationszeiten im Nanosekundenbereich und mit einer hohen Bildrate aufzunehmen. Für diesen Zweck wird ebenso der Einsatz der aktiven Beleuch-

tung vorausgesetzt. Der entscheidende Vorteil dieses Sensor gegenüber der Lösung in [116] liegt in der Verwendung des On-Chip synchronen elektronischen Shutters, der kurze Integrationszeiten ermöglicht und in der Abspeicherung der integrierten Werte. Die Auslese, die anschließend bei den hohen Bildraten erfolgt, braucht keine Ausleseschaltung mit Bandbreiten wie in [116]. Andererseits ermöglicht die schnelle Ausleserate trotz einer digitalen Mittelung eine kürzere Meßdauer als in [112]. Da die entwickelten CMOS-Bildsensoren nicht speziell für diese Anwendung vorgesehen waren, läßt sich in einem Standard-CMOS-Prozeß ein Bildsensor entwickeln, der eine bessere Leistung bezüglich der angestrebten Laufzeitmessung implementiert. Ein Vorschlag für das Design eines solchen Bildsensors mit einer geringeren Auflösung ist ebenso gegeben. Er soll aufgrund der großflächigen Photodioden bessere Rauscheigenschaften haben und in der Ausleseschaltung eine mehrfache Integration implementieren.

Als letztes Anwendungsbeispiel ist die Überwachungstechnik genannt worden. Diese Anwendung ist extra ausgeführt worden, da sie im Unterschied zu der optischen Meßtechnik keine strukturierte, sondern eine diffuse modulierte Beleuchtung benötigt. Zudem setzt sie einige am FhG IMS entwickelte Algorithmen auf der Basis der verschiedenen Referenzbildmethoden voraus, die als Eingangsinformation die Daten aus den entwickelten CMOS-Bildsensoren verwenden. Aufgrund des Sensorbetriebes mit kurzen Integrationszeiten und schnellen Bildraten werden sehr informationsreiche Bilddaten für die Vordergrund- bzw. Hintergrundextraktion als Eingangsdaten geliefert.