

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Ein allgemeiner Trend in der Entwicklung von integrierten Bildsensoren ist in den letzten Jahren durch den Einsatz der Standard-CMOS-Technologie geprägt worden, deren gefertigte Produkte heutzutage über 80 % des gesamten Volumens auf dem Halbleitermarkt darstellen. Gemäß den zahlreichen Vorteilen der hohen Integrierbarkeit und Flexibilität soll mit der Standard-CMOS-Technik eine funktionsüberlegene und preisgünstigere Alternative gegenüber den heutigen CCD-Sensoren für die Zukunft ausgebaut werden. Den ersten Erfolgen bei der Realisierung von CMOS-Bildsensoren für Standardvideoanwendungen folgend und aufgrund der ständig wachsenden Bedürfnisse im wissenschaftlichen und industriellen Bereich nach preiswerteren Alternativen zu existierenden CCD-Sensoren für Hochgeschwindigkeitskinematographie hat sich diese Arbeit mit der Entwicklung von CMOS-Bildsensoren für diese Anwendungen auseinandergesetzt.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten CMOS-Bildsensoren stellen eine neue Basis für die moderne Hochgeschwindigkeitskinematographie dar. Sie nutzen weitgehend die Vorteile der Standard-CMOS-Technik für die Implementierung der wichtigen Sensoreigenschaften, die für die angestrebten Anwendungen relevant sind.

Um die Problematik und die Anforderungen der Hochgeschwindigkeitskinematographie besser zu verstehen, wurden zuerst klassische Realisierungen wie opto-mechanische und elektro-optische Kamerasysteme sowie moderne Kamerasysteme auf Basis der CCD-Technik vorgestellt. Dabei ist insbesondere bei den integrierten CCD-Sensoren auf die für die CMOS-Technik verwandte Problematik wie die Regelung der Integrationszeit, Smearing und Blooming anhand der verschiedenen CCD-Sensortypen (FT-CCD, IL-CCD, usw.) näher eingegangen worden. Die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Pixel mit Photodioden verwenden einen elektronischen Shutter, der eine einfache und eine im Vergleich zum genutzten Resetmechanismus bei CCDs von Übersprechstörungen freie Regelung der Integrationszeit gewährleistet. Zudem ermöglicht der elektronische Shutter durch seine globale Ansteuerung im Zusammenhang mit der im Pixel verwendeten Speicherkapazität eine synchrone Belich-

tung aller Pixel und anschließend eine zerstörungsfreie Auslese. Mit den Integrationszeiten im unteren Mikrosekundenbereich sind bei der synchronen Beleuchtung für alle Standardanwendungen der Hochgeschwindigkeitskinematographie Aufnahmen ohne Verschmierungen („blur“) gewährleistet. Die Unterdrückung von Smearing ist einerseits schon durch das Entfallen des Ladungstransfers als Ausleseprinzip bei einem CMOS-Bildsensor und andererseits durch eine sorgfältige Abschirmung aller relevanten im Pixel eingesetzten aktiven Bauelemente gelöst worden. Dies stellt einen enormen Vorteil gegenüber den teilweise sehr aufwendigen externen Lösungen dar, auf die FT-CCDs und FF-CCDs zurückgreifen müssen. Für einen einfachen Antibloomingmechanismus wird beim CMOS-Sensor ein bereits für das Zurücksetzen des Pixels notwendiger Transistor gebraucht.

Unter den für diese Anwendung geeigneten unterschiedlichen Prinzipien wurden zum einen ein einfaches Pixel mit elektronischem Shutter und zum anderen ein Pixel für synchrone Auslese und Integration vorgestellt. Unabhängig von der Realisierung des jeweiligen Typs entspricht die Integrationsdauer des einfachen Pixels mit elektronischem Shutter einer Differenz der Bild- und Auslesezeit, während bei einem Pixel mit synchroner Auslese und Integration die Integrationsdauer bis auf die Bilddauer erhöht werden kann. Eine analytische Untersuchung aller wichtigen Pixelgrößen bei diesen Anwendungen wie beispielsweise der Empfindlichkeit, des Füllfaktors, des Rauschens und des daraus resultierenden Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und Dynamikbereiches (DR) hat gezeigt, daß sich das einfache Pixel mit elektronischem Shutter im Standard-Modus für die angestrebten Anwendungen am besten eignet. Obwohl das Pixel für eine synchrone Integration und Auslese mit verwendetem Buffer die Integrationszeit unabhängig von der Auslesezeit macht, ist dieses Pixel auf Kosten eines schlechteren Füllfaktors¹, SNR und DR nur dann zu verwenden, wenn solche Integrationszeiten ausdrücklich verlangt sind.

Zwei im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte und gefertigte CMOS-Bildsensoren benutzen das einfache Pixel mit elektronischem Shutter, basieren aber auf zwei unterschiedlichen Konzepten für die interne Architektur, Signalauslese, Rauschunterdrückung und Bildverbesserung. Der erste CMOS-Bildsensor mit einer Auflösung von 128×128 Pixel nutzt den Vorteil des schnellen Stromausleseprinzips, für dessen Zweck ein spezieller Stromausleseverstärker entworfen und spaltenorientiert in einer Verstärkerbank eingesetzt ist. Bei einer baumförmigen Auslesearchitektur ermöglicht die gesamte Ausleseelektronik einen Pixeltakt von 22 MHz an einem analogen Ausgang. Bei Integrationszeiten von $1 \mu\text{s}$ bis $150 \mu\text{s}$ ergeben sich für diesen Bildsensor Bildraten von mehr als 1000 Bilder/s. Das verwendete Stromausleseprinzip hat den Nachteil, daß das verursachte örtliche Rauschen („fixed pattern noise“, FPN) nicht nur eine signalunabhängige, sondern auch eine signalabhängige Komponente aufweist. Da sich daher ein Einsatz des CDS-Verfahrens zur Beseitigung des FPN nicht lohnen würde, muß bei diesem CMOS-Bildsensor die Präsenz eines zeitlichen $1/f$ -Rauschens einkalkuliert

¹Während die resultierende Empfindlichkeit aufgrund der längeren Integrationszeiten dennoch höher als beim anderen Pixeltyp ist, wird sie deutlich kleiner, falls die Integrationszeiten verkürzt werden.

werden. Andererseits läßt sich das FPN mit dem hier vorgestellten Algorithmus sehr einfach effizient unterdrücken. Da bei dieser Anwendung die Bildaufnahme und -wiedergabe durch eine Zwischenspeicherung der Daten zeitlich voneinander unabhängig sind, reicht eine externe FPN-Korrektur in vielen Fällen aus, wo die Kamera im Verbund mit einem Rechner angeboten wird. Der zweite realisierte CMOS-Bildsensor mit 256×256 Pixel implementiert eine On-Chip-Realisierung des CDS-Verfahrens für eine effektive Rauschunterdrückung. Trotz der für dieses Verfahren benötigten zweifachen Auslese der Daten und einem langsamen Spannungsauslesemodus ermöglicht der Sensor aufgrund eines vorgeschlagenen Pipelineablaufs, bei dem eine synchrone zweistufige Auslese der Daten aus der Matrix zu den Chipausgängen stattfindet, einen hohen Pixeltakt am Ausgang. Die erreichten Bildraten von mehr als 1000 Bilder/s bei Integrationszeiten zwischen $1 \mu\text{s} - 150 \mu\text{s}$ entsprechen einem effektiven Pixeltakt von 88 MHz an den vier analogen Ausgangskanälen. Die hohe geforderte Regelmäßigkeit der photoempfindlichen Matrix ist keineswegs durch eine mehrfache Kanalauslese gestört, da eine geschachtelte Zusammenfassung der Spaltenleitungen in vier Kanäle erst in der Ausleseelektronik stattfindet. Aufgrund dessen und des realisierten CDS-Verfahrens ist eine hochwertige Bildqualität ohne jegliche zusätzliche externe FPN-Korrektur garantiert. Neben der erwähnten Unterdrückung von signalunabhängigem FPN findet beim CDS-Verfahren gleichzeitig eine umfassende Unterdrückung des $1/f$ -Rauschens statt. Beide CMOS-Bildsensoren weisen zudem aufgrund einer zeilenweisen Auslese und Abarbeitung der Signalinformation eine deutlich geringere Verlustleistung als CCD-Sensoren auf, bei denen die gesamte Matrix (und bei FT- und FIT-CCDs zusätzlich der Speicherbereich) getaktet wird. Bei den entwickelten Sensoren beträgt die Verlustleistung 280 mW bzw. 320 mW je nach Realisierung, während bei CCD-Sensoren mit vergleichbarer Auflösung mehr als 1 W verbraucht wird. Ferner werden im Vergleich zu CCD-Sensoren effektiv niedrigere Versorgungsspannungen benötigt.

Über die Hochgeschwindigkeitskinematographie hinaus wurde im Rahmen dieser Arbeit auch die Eignung der entworfenen CMOS-Bildsensoren für den Einsatz in anderen Anwendungsgebieten untersucht und vorgestellt. So hat die Fähigkeit der Bildsensoren, zuverlässig und unter Beibehaltung der wichtigen Eigenschaften bei Bildraten zwischen 200 und 800 Bilder/s als Bestandteil von Bildverarbeitungssystemen mit heutigen leistungsstarken Mikroprozessoren (oder DSPs) zu arbeiten, die Möglichkeit für einen Einsatz im Maschinellen Sehen eröffnet. Weitere Einsatzgebiete finden sich im Bereich der optischen 3D-Meßtechnik, wo Bildsensoren in Kombination mit einer aktiven Beleuchtung arbeiten. In diesem für viele industrielle Anwendungen sehr interessanten Einsatzgebiet, bei dem ein Meßbereich von einigen Metern bei einer Auflösung im cm-Bereich ausreicht, werden die Vorteile der entwickelten CMOS-Bildsensoren mit sehr kurzen Integrationszeiten und hohen Bildraten sehr effektiv ausgenutzt. So wurde eine Realisierung für die Abstandsmeßtechnik basierend auf dem Lichtschnittverfahren und eine direkte Lichtlaufzeitmessung, die auf der Zeitauflösung des elektronischen Shutters im Nanosekundenbereich basiert, vorgestellt und

die Perspektive für zukünftige Einsätze aufgezeigt. Schließlich ist der Einsatz der Sensoren in der Überwachungstechnik präsentiert worden, bei der nicht mit strukturierter, sondern mit diffuser Beleuchtung gearbeitet wird. Der Einsatz von kurzen Integrationszeiten im gepulsten Betrieb führt zu entscheidenden Vorteilen bei der Akquisition von Eingangsdaten für die am FhG-IMS entwickelten Algorithmen für die Bewegungsanalyse.

Ausblick

Obwohl zur Zeit CCD-Sensoren die dominierende Technik auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitskinematographie darstellen, ist es abzusehen, daß diese auf hohe Empfindlichkeit, niedriges Rauschen, kleine Pixel und gute Bildqualität optimierte Technik in der nahen Zukunft durch CMOS-Bildsensoren stark unter Druck gesetzt wird. Durch die Nutzung von Submikrometerprozessen wird es möglich, Sensoren mit vergleichbarer Auflösung in CMOS-Technik zu realisieren.

Insbesondere stellen einige Vorteile der CMOS-Bildsensoren wie Unterdrückung von Smearing, Verschmierungen und eine effiziente Realisierung des elektronischen Shutters zur synchronen Bildaufnahme prinzipiell bessere Alternativen als in der CCD-Technik dar, weil in CCD-Technik an der Minimierung und nicht an der grundsätzlichen Beseitigung der störenden Effekte gearbeitet wurde. Zudem ist in der Standard-CMOS-Technik eine effiziente Implementierung der schaltungstechnischen Maßnahmen auf dem gleichen Chip möglich. Neben einem im Rahmen dieser Arbeit realisierten CDS-Verfahren könnten in näherer Zukunft CMOS-Bildsensoren mit On-Chip-Analog/Digital-Umsetzer ausgerüstet werden. Eine sehr gute Basis hierfür bildet aufgrund der hochwertigen Qualität der akquirierten Bilder insbesondere der realisierte 256×256 -Pixel-CMOS-Bildsensor. Durch die zusätzliche Integration von schnellen, leistungsarmen und platzsparenden A/D-Umsetzern, wie sie auch am FhG IMS [120] vorgeschlagen wurde, könnte eine Vielzahl an Vorteilen wie beispielsweise der Einsatz einer etwas einfacheren analogen On-Chip-Elektronik, eine deutlich störungsunanfälligere Datenübertragung usw. bringen. Zusätzlich würden bei existierender digitaler Schnittstelle die Kosten weiterhin drastisch gesenkt werden können.

Weitere Aktivitäten, die aus dieser Arbeit hervorgehen, sind Bildsensorentwicklungen für den Bereich der optischen Meßtechnik. Eine große Herausforderung stellen Aktivitäten bezüglich der Weiterentwicklung von Sensoren mit einer Zeitauflösung im Nanosekundenbereich für Lichtlaufzeitmessungen dar. Diese würden als preisgünstigere Lösung neue Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen industriellen Anwendungen ermöglichen.