

■ Alle Funktionen an Bord

In Digitalkameras werden CCDs zunehmend durch CMOS-Bildsensoren ersetzt.

Der Mensch fotografiert und filmt dank Digitaltechnik wie nie zuvor. Allein bei der Social-Media-Plattform Instagram laden User pro Tag mehr als 50 Millionen Fotos hoch, bei Facebook sind es 350 Millionen. Einen gewaltigen Schub gab es durch Smartphones, die Digitalfotografie jederzeit und überall ermöglichen. Der Bildsensor ersetzt bei Digitalkameras den fotografischen Film. Er wandelt Intensität und Richtung des einfallenden Lichts in eine elektrische Ladung um. Aus dieser Ladung wird in der Kamera eine Spannung erzeugt, die als Eingangssignal für die Digitalisierung der Bildinformation dient. Jeder Bildsensor besteht aus einzelnen lichtempfindlichen Pixeln, die matrixförmig auf einem Siliziumchip angeordnet sind. Der lichtempfindliche Teil eines Pixels ist im einfachsten Fall ein einzelner pn-Übergang.

Die Umwandlung des Lichts in eine elektrische Ladung basiert auf dem inneren Photoeffekt: Die einfallenden Photonen erzeugen im Silizium Elektronen, die frei im Leitungsband wandern. Die Zahl der Elektronen ist dabei proportional zur Anzahl der Photonen. Dieses Prinzip lässt sich mit zwei Bauformen realisieren. Der Bildsensor einiger billiger Kompaktkameras ist immer noch ein CCD (Charge-Coupled Device). Im Anschluss an die Belichtung überträgt ein CCD die Ladung jedes einzelnen Pixels einer Zeile nacheinander in ein gemeinsam genutztes Transferregister.

Die Pixelmatrix wird Zeile für Zeile ausgelesen. Danach erfolgt die

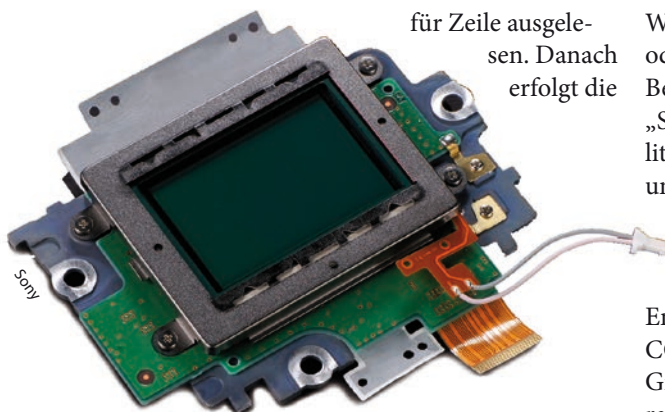


Foto: G. Goodlitz

Fotografie ist ein beliebtes Hobby – ob mit digitaler Spiegelreflex- bzw. Kompaktkamera oder mit dem Smartphone.

Verschiedene Bildsensoren wandeln darin das einfallende Licht in eine elektrische Spannung um.

Spannungswandlung. Immer mehr Kameras beinhalten inzwischen aber einen CMOS-Bildsensor (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Dabei handelt es sich um die etablierte Standardtechnologie für die Fertigung von integrierten Schaltkreisen. CMOS-Bildsensoren ermöglichen es, Funktionen zu integrieren und z. B. die Ladung bereits innerhalb des Pixels mit Hilfe einer Verstärkerschaltung in eine Spannung umzuwandeln. Die Auslese der Spannungssignale der CMOS-Pixel erfolgt spaltenweise nacheinander (Abb. 1).

Durch die Umwandlung der Ladung innerhalb des Pixels sind weitere Schritte direkt auf dem Chip möglich: Analog-Digital-Wandlung, Rauschunterdrückung oder auch Belichtungskontrolle. Bei geringer Baugröße bieten diese „Systems on Chip“ viel Funktionalität. Dank der Pixel-Technologie und der höheren Integrationsdichte der CMOS-Sensoren ist die Wärmeentwicklung geringer.

Dadurch reduziert sich der Energieverbrauch im Vergleich zu CCD-Sensoren um ungefähr eine Größenordnung. So hält der Kamera-Akku länger, und selbst große

Bildsensoren lassen sich mit hoher Geschwindigkeit kontinuierlich auslesen, ohne dass sich die Kamera zu stark erwärmt.

Allerdings haben CMOS-Bildsensoren auch Nachteile gegenüber CCDs, die sich mittlerweile aber drastisch verringert haben. So führen die fertigungsbedingten minimalen Unterschiede zwischen den Transistoren der einzelnen CMOS-Pixel zu leichten Intensitätsunterschieden im Digitalbild bei einer homogen ausgeleuchteten Motivfläche. Diese Verfälschung lässt sich bei der Bildverarbeitung aber sehr gut wieder korrigieren. Zudem ist der lichtempfindliche Anteil der Pixelfläche geringer, da sich in den Pixeln sowohl die Verarbeitungslogik als auch die Leitungen für das Auslesen der Pixelmatrix befinden. Je nach CMOS-Sensor stehen nur 50 Prozent der Fläche zur Verfügung. Heute sorgt daher in den meisten Smartphone-, Digital- und Videokameras ein Array aus Mikrolinsen dafür, dass das einfallende Licht in jedem Pixel auf den lichtempfindlichen Teil fokussiert wird.

Eine weitere Maßnahme, um die Quantenausbeute zu erhöhen, sind

„Back-Side-Illuminated“-Sensoren, die vor allem bei Smartphone-Kameras zum Einsatz kommen. Dort sind die Sensorflächen aus baulichen Gründen so klein, dass eine „Verschattung“ der lichtempfindlichen Pixelbereiche besonders zu Buche schlägt. Bei einem solchen Sensor liegt der pn-Übergang vor der Schaltung, sodass das einfallende Licht direkt auf ihn trifft. Dazu wird der Sensor auf einem Siliziumsubstrat gefertigt, das nach der Herstellung von hinten abgetragen wird, bis es transparent ist. Die teurere Technologie rechnet sich aufgrund der hohen Stückzahlen für Smartphone-Bildsensoren.

Bunte Bilder

Unabhängig von der Realisierung als CCD oder CMOS liefern Bildsensoren nur einen Helligkeitseindruck. Daher benötigen sie Farbfilter. Im häufigsten Fall sind die roten, blauen und grünen Elemente zu einem Karomuster zusammengesetzt, das an die Pixelgröße angepasst ist. Bei dieser Bayer-Matrix entfällt etwa die Hälfte der Fläche auf die grünen Elemente. Die andere Hälfte besteht zu gleichen Teilen aus roten und blauen Elementen, um die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges abzubilden.

Häufig wird als Qualitätsmerkmal eines Bildsensors die Pixelzahl angegeben. Verschiedene Kameras mit gleicher Pixelzahl liefern aber völlig unterschiedliche Qualität, wenn die Fläche des Sensors stark

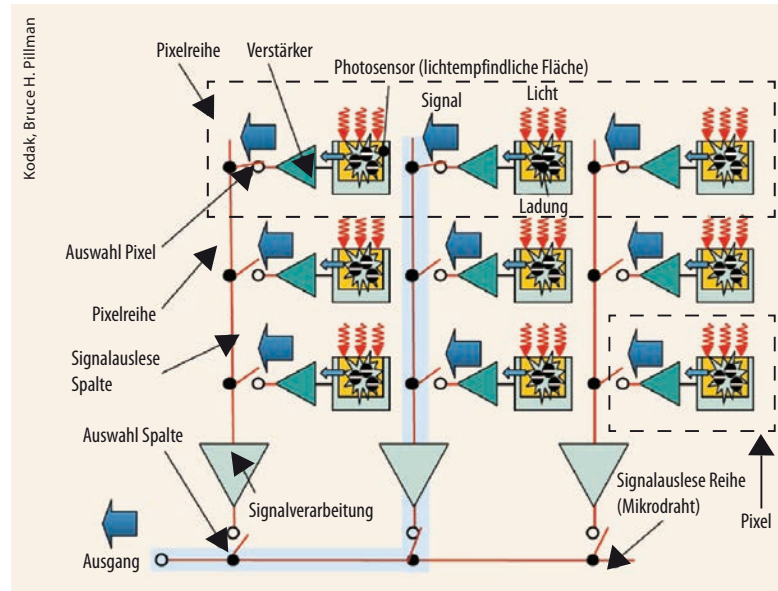


Abb. 1 In CMOS-Bildsensoren werden durch den inneren Photoeffekt Elektronen frei. Das Signal wird innerhalb des Pixels zeilenweise weitergegeben. Schalter

voneinander abweicht. Weniger Pixel bieten bei gleicher Fläche mehr Qualität, weil das Signal-zu-Rausch-Verhältnis größerer Pixel deutlich besser ist. Zudem speichern große Pixel mehr Elektronen, wodurch sich der dynamische Bereich des Pixels vergrößert. Der Abstand zwischen minimalen und maximalen Intensitätswerten, die weder im Rauschen untergehen noch den Sensor zum Übersteuern bringen, ist also größer, die Bildqualität damit besser. Die Pixel aktueller CMOS-Sensoren haben Seitenlängen zwischen etwa einem (Smartphones) und rund acht Mikrometern (manche Vollformatkamera).

ter dienen dazu, die Pixel einer Zeile auszuwählen, die dann spaltenweise ausgelesen werden (blau).

Physikalisch macht eine Pixelgröße, die kleiner ist als die Beugungsgrenze der verwendeten Optik, keinen Sinn. Fertigen lassen sich die kleinen Pixelgrößen aber. Daher kompensieren clevere Algorithmen bei Pixeln mit kleineren Abmessungen als die Beugungsgrenze das Rauschen. Zukünftig kann eine fortschreitende Miniaturisierung also auch bei kleinen Sensorflächen helfen, der Beugungsgrenze näher zu kommen.

Ich danke Uwe Artmann von der Image Engineering GmbH & Co. KG, Frechen, für hilfreiche Erläuterungen.

Michael Vogel

Newsletter des Physik Journal

Mit Online-Meldungen aus der Redaktion, Neuigkeiten aus der DPG, Forschungsnachrichten und TV-Tipps

Registrierung unter:
www.dpg-physik.de/mitgliedschaft/aenderung.html

