

Innovative Bildaufbereitung in Hochgeschwindigkeitskameras

Digitale Bilder sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Die meisten Hersteller von digitalen Kameras befinden sich in Asien. Im Nischensegment der Hochgeschwindigkeitskameras gehört jedoch das in Baden-Dättwil ansässige Unternehmen AOS Technologies AG zu den führenden Anbietern. Mit AOS zusammen haben wir neue, effiziente Algorithmen und entsprechende Bildbearbeitungssoftware entwickelt, um bei Bildraten von dreissig Bildern pro Sekunde hochqualitative RGB-Bilder ohne störende Farbmoiréeffekte direkt in der Kamera zu erzeugen.

Martin Schindler, Christoph Stamm | christoph.stamm@fnhw.ch

Industrielle Bildverarbeitung kommt heute in sehr vielen Industriezweigen zum Einsatz. Auch in Bereichen, wo digitale Kameras nicht gleich auf Anhub erwartet würden, erfüllen sie unerlässliche Beobachtungs-, Überwachungs- und Analyseaufgaben. Hochentwickelte Hochgeschwindigkeitskameras werden längst nicht mehr nur zur Gewinnung von Zeitlupenaufnahmen bei Crash-Tests eingesetzt, sondern immer mehr auch zur Feinkalibrierung und Optimierung von vollautomatischen Produktionsstrassen. Mit bis zu zehntausend Bildern pro Sekunde können entscheidende Details von schnellen Abläufen erfasst werden, welche für die Effizienz und das Gelingen ausschlaggebend sein können.

Im vorliegenden Bericht beschreiben wir ein gemeinsames Projekt¹ mit dem in Baden-Dättwil ansässigen Unternehmen AOS Technologies. Gemeinsam entwickelten wir ein neues, innovatives Bildaufbereitungsverfahren für Hochgeschwindigkeitskameras. Dieses Verfahren ermöglicht ohne nachgeschalteter Bildaufbereitung in einem separaten Rechner die Erzeugung von klaren, qualitativ hochstehenden Bildern direkt in der Kamera. Die Bildaufbereitung umfasst das Entfernen von Rauschen (Fixed-Pattern- und Banding-Noise), die Generierung eines RGB-Bildes durch Bayer-Pattern-Interpolation, Helligkeits- und Kontrastanpassung und Weissabgleich. Um eine solche Bildaufbereitung in Echtzeit bei mindestens 30 Bildern pro Sekunde zu ermöglichen, sind sehr effiziente und innovative Algorithmen notwendig.

Der zeitaufwendigste Teil dieser Bildaufbereitung ist die Bayer-Pattern-Interpolation, bei der die roten, grünen und blauen Anteile eines RGB-Bildpunktes aus den örtlich separierten RGB-Anteilen der Bayer-Pattern interpoliert werden. Dabei kann es je nach Verfahren vorkommen, dass für

die roten und blauen Anteile unterschiedliche Interpolationsrichtungen verwendet werden, was vor allem in fein texturierten Bildbereichen zu optisch störenden Farbmoiréeffekten führen kann.

Aufbau digitaler Kameras

Das Kernstück einer digitalen Kamera ist der Bildsensor. Ein Bildsensor ist eine regelmässige Anordnung von mehreren Millionen einzelner Fotodioden (Lichtsensoren). Dabei bestimmt die Anzahl der Fotodioden die maximale Bildauflösung. In den verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Digitalkameras kommen üblicherweise zwei verschiedene Arten von Bildsensoren zum Einsatz: In Kompaktkameras werden fast ausschliesslich CCD-Sensoren verbaut, während in Profikameras und Camcordern mehrheitlich CMOS-Sensoren anzutreffen sind. Die Vorteile der CMOS-Sensoren sind vor allem der geringere Stromverbrauch, die höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit, sowie die Möglichkeit nur bestimmte Regionen auszulesen. Der Stromverbrauch beträgt etwa 1/10 eines CCD-Sensors. Bei CMOS-Sensoren besitzt zudem jede einzelne Fotodiode einen Verstärker, was das direkte Auslesen einzelner Bildpunkte (Pixel) grundsätzlich ermöglicht [Sen].

Eine Fotodiode wie auch ein gesamter Bildsensor kann nur Helligkeitsinformationen (Graustufenbilder) verarbeiten. Um zu den Farbinformationen zu gelangen werden den Sensoren auf verschiedene Arten Farbfilter vorgeschaltet. Die am häufigsten verwendete Art ist die nach ihrem Erfinder benannte Bayer-Pattern [Bay]. Dieses schachbrettähnliche Muster besteht zu je 25% aus Rot und Blau und zu 50% aus Grün (siehe Abb. 4). Grün kommt deshalb doppelt so oft vor, weil das menschliche Auge auf Grün empfindlicher reagiert als auf andere Farben. Dieser Farbfilter hat aber zur Folge, dass für jeden Pixel jeweils nur eine von drei notwendigen Farbinformation bekannt ist. Die beiden fehlenden Farbinformationen müssen aus den angrenzenden interpoliert werden.

¹ Mit freundlicher finanzieller Unterstützung des Forschungsfonds des Kantons Aargau.

Bestimmung der Sollwerte eines Kanals einer Sensorzeile

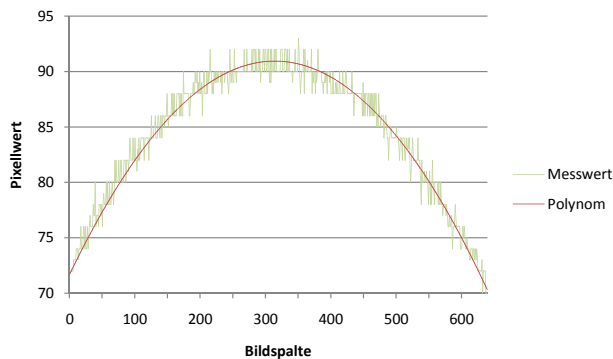


Abbildung 2: Bestimmung der Sollwerte eines Farbkanals einer Sensorzeile

Ein zweiter Ansatz stammt von der Firma Foveon bzw. Sigma. In deren Ansatz [Fov] wird der Effekt ausgenutzt, dass Photonen unterschiedlicher Wellenlängen (Farbe) unterschiedlich tief ins Silizium eindringen. Langwelliges rotes Licht dringt tiefer ein als kurzwelliges blaues Licht. Daher werden pro Pixel drei Lichtsensoren übereinander angeordnet, womit alle drei Farbinformationen parallel erfasst und auch ausgelesen werden können. Eine dritte Möglichkeit, welche vor allem in teuren Kameras eingesetzt wird, ist die Aufteilung des einfallenden Licht in dessen drei Grundfarben mittels eines Strahlteilerprismenblocks. Durch geschickte und kompakte Anordnung von teildurchlässigen und teilreflektierenden Prismen lassen sich drei separate Bildsensoren (je einen für Rot, Grün und Blau) verwenden. Dadurch sind für jeden Pixel alle drei Farbinformationen separat abrufbar.

Je nach Aufbau des Bildsensors kommt es beim Auslesen der Helligkeits- bzw. Farbinformationen zu kleinen Ungenauigkeiten. Diese Ungenauigkeiten werden vom Betrachter als Rauschen wahrgenommen. CMOS-Sensoren rauschen üblicherweise stärker als CCD-Sensoren. Der Grund dafür ist im Aufbau des CMOS-Sensors zu finden. Das Licht wird von Fotodioden eingefangen, verstärkt und mit AD-Wandlern in ein digitales Signal gewandelt. Dabei entstehen, bedingt durch die Toleranzen der einzelnen Komponenten, kleine Differenzen zwischen den Pixeln. Da der CMOS-Sensor spaltenweise ausgelesen, verstärkt und quantifiziert wird, entsteht ein streifenartiges Muster, das sogenannte Banding-Noise (siehe Abb. 1 auf der Umschlagrückseite). Als Fixed-Pattern-Noise wird das pro Pixel individuelle Rauschen bezeichnet, welches durch die Toleranzen der einzelnen Pixelverstärker verursacht wird [Rau]. Sowohl bei Banding- als auch bei Fixed-Pattern-Noise handelt es sich um fast konstante Muster, welche weniger vom Bildinhalt als von der Betriebstemperatur des Sensors abhängen. Beide Arten von

Lineare Korrekturfunktion

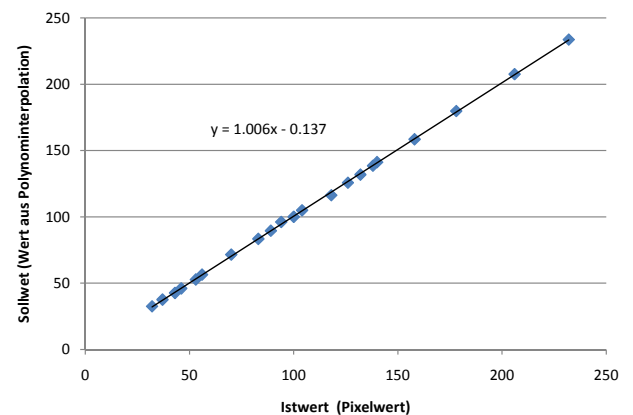


Abbildung 3: Beispiel einer linearen Korrekturfunktion pro Farbkanal und Pixel

Rauschen sind auf allen Digitalbildern mehr oder weniger stark zu sehen.

Reduktion des Rauschens

Im vorliegenden Projekt arbeiten wir mit einem CMOS-Farbsensor von Micron mit einer Auflösung von 1.3 Megapixel [MT9M413]. Dieser Bildsensor erzeugt Farbbilder mithilfe einer Bayer-Pattern-Interpolation und ermöglicht Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei voller Sensoraufklärung mit 500 Bildern pro Sekunde. Mit einer Halbierung der Bildauflösung lässt sich jeweils die Bildrate verdoppeln. Wie oben bereits erwähnt, ist die Bildqualität von CMOS-Farbsensoren infolge verschiedener Arten des Rauschens vermindert. Mit entsprechenden Massnahmen sollen vor allem die konstanten Muster (Fixed-Pattern- und Banding-Noise) möglichst gut eliminiert werden. Eine typische Eigenschaft der Farbsensoren mit Bayer-Pattern sind die beiden unterschiedlichen Helligkeiten der grünen Pixel auf den geraden und ungeraden Zeilen. Diese müssen auf eine gemeinsame Helligkeit korrigiert werden, da sonst ein horizontales Streifenmuster auf dem Grünkanal entstehen würde.

Der von AOS eigens entwickelte Algorithmus berechnet für jeden Pixel anhand von unterschiedlich belichteten Helligkeitsbildern (Referenzbildern) eine Korrekturfunktion, die den einzelnen Pixel auf den Mittelwert des Gesamtbildes korrigiert. Die Helligkeitsbilder sollten dabei möglichst homogen ausgeleuchtet sein und das gesamte Farbspektrum abdecken, also möglichst gleichmässig grau sein. Eine solche gleichmässige Ausleuchtung lässt sich in der Praxis allerdings kaum mit vernünftigem Aufwand erzielen. Oft sind die Bilder im Zentrum heller und werden gegen den Rand hin dunkler.

Der von uns neu entwickelte Korrekturalgorithmus geht von n inhomogen ausgeleuchteten Referenzbildern aus. Pro Zeile und Farbkanal (Rot, Grün, Blau) der n Referenzbilder werden die

vorhandenen Pixelintensitäten durch ein Polynom interpoliert. Die Werte dieser Polynominterpolation bilden dann die Sollwerte zur Berechnung der Korrekturfunktionen (Abb. 2). Pro Kanal und Pixel erhält man so n Mess- und Sollwerte. Daraus wird pro Kanal und Pixel eine lineare Korrekturfunktion interpoliert (Abb. 3). Die zwei Koeffizienten der linearen Korrekturfunktion werden pro Farbkanal und Pixel gespeichert und bei jeder Aufnahme mit dem Sensor abgerufen und entsprechend angewandt. Da eine solche Korrekturfunktion individuell auf eine Digitalkamera samt ihrem zugehörigen Bildsensor zugeschnitten ist, muss sie für jede Kamera separat ermittelt werden.

Bayer-Pattern-Interpolation

Die digitalisierten Rohdaten eines Farbsensors mit Bayer-Pattern umfassen jeweils nur eine von drei notwendigen Farbinformationen pro Pixel. Die beiden fehlenden Farbinformationen für ein vollständiges RGB-Bild müssen aus den vorhandenen Werten mit Hilfe eines Algorithmus interpoliert werden. Auf den ersten Blick scheint dies einfach zu sein. So könnte man zum Beispiel die beiden (bei Rot und Blau), resp. vier (bei Grün) bekannten gleichfarbigen Nachbarn nehmen und davon den Mittelwert berechnen. Dieser Ansatz kann allerdings bei starken Kanten und regelmäßigen Texturen zu störenden Farbfehlern, sogenannten Farbmoirés, führen (siehe Abb. 4 auf der hinteren Umschlaginnenseite). Zu Moirés kommt es im Allgemeinen, wenn zwei regelmässige Raster in unterschiedlichem Winkel übereinander gelegt werden. Die Frequenz des Moirés von zwei Rastern mit gleicher Gitterweite ist proportional zum Sinus des Zwischenwinkels. Das heisst, vor allem bei spitzem Zwischenwinkel entstehen tief-frequente, stark störende Moiréeffekte. Bei digitalen Aufnahmen, die zu Moiréeffekten führen, ist der Bildsensor das eine Raster und das regelmässige Muster, welches fotografiert wird, das zweite Raster.

Eine erste wesentliche Qualitätsverbesserung gegenüber dem oben erwähnten einfachen Interpolationsalgorithmus wird erreicht, indem nicht nur die gleichfarbigen Pixel zur Interpolation eines fehlenden Pixels herbeigezogen werden, sondern auch die direkten Nachbarn, welche nicht von derselben Farbe sind. Eine zweite Qualitätsverbesserung kann durch die Bestimmung einer dominanten Interpolationsrichtung erreicht werden. Die dominante Interpolationsrichtung wird dann für alle Farbkanäle verwendet und führt zu einer besseren Erhaltung von Kanten. Um jeweils die dominante Interpolationsrichtung ausfindig machen zu können, muss pro Pixel eine lokale Bildregion analysiert werden. Im aktuellen „state-of-the-art“-Algorithmus was die Bildqualität betrifft, wird mit sehr grossem Aufwand die dominante Interpolationsrichtung ausfindig

gemacht [CC06]. Dazu werden die Varianzen der Farbdifferenzen über eine Nachbarschaft von neun Pixeln berechnet.

All diese zusätzlichen Qualitätsverbesserungen erfordern zusätzlichen Rechenaufwand und reduzieren somit die Anzahl RGB-Bilder, welche pro Sekunde generiert werden können.

DaVinci Digital Media Processor

In unserem Projekt arbeiten wir mit einem DaVinci Digital Media Processor TMS320DM6437 von Texas Instruments [DMP]. Dieser Prozessor bietet grundsätzlich die Möglichkeit, eine Bayerkonvertierung in einem speziellen Hardwareblock, der sogenannten Preview-Engine, effizient zu berechnen. Die Preview-Engine selber ist eine mehrstufige, parametrisierbare Bildverarbeitungskette innerhalb des Video Processing Front End, welche z.B. Weissabgleich, Gammakorrektur, Helligkeits- und Kontrastanpassung, RGB- YC_bC_r -Konvertierung umfasst. Als Eingabedaten werden Rohdaten im Bayer-Format verarbeitet, die entweder direkt aus einem Bildsensor oder aus dem Speicher stammen.

Die übliche Hauptaufgabe der Preview-Engine ist die Bayer-Pattern-Interpolation zur Erzeugung eines RGB- resp. YUV-Bildes. Der Interpolationsalgorithmus ist jedoch fix und lässt sich nicht unseren individuellen Wünschen anpassen. Hingegen lässt er sich als Ganzes ausschalten und dadurch können die restlichen Funktionen der zuvor beschriebenen Bildverarbeitungskette zur Farb-anpassung verwendet werden. Unsere Implementierung des Interpolationsalgorithmus ist somit unabhängig von der Preview-Engine, nutzt aber natürlich die Möglichkeiten des Prozessors, Daten parallel verarbeiten zu können. So kann der Prozessor beispielsweise innerhalb eines Taktzyklus vier 8-Bit Multiplikationen gleichzeitig berechnen. Vor allem ist aber der parallele Zugriff auf den Bildspeicher entscheidend für eine schnelle Verarbeitung der Daten. Deshalb ist es wichtig, dass pro CPU-Takt immer 8 Bytes gelesen oder geschrieben werden.

Eine erste, einfache Implementierung ohne Optimierungen des originalen Interpolationsalgorithmus von Chung und Chan führt auf dem Prozessor zu einer Bildrate von weniger als einem Bild pro Sekunde bei einer Bildauflösung von 800 mal 600 Pixel, womit die Interpolation mehr als einen Faktor dreissig zu langsam für unsere Anwendung ist. Werden im gleichen Algorithmus alle wesentlichen Teile durch auf Assemblerebene optimierte Funktionen ersetzt, so erhöht dies zwar wesentlich die Performanz, aber die geforderte Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde wird mit ca. 4 Bildern pro Sekunde nicht annähernd erreicht. Deswegen muss ein Kompromiss zwischen Interpolationsqualität und Verarbeitungsgeschwindigkeit angestrebt werden. In unserem

Fall besteht der Kompromiss darin, dass wir vollständig auf die Bestimmung der dominanten Interpolationsrichtung verzichten.

Interpolationsalgorithmus

Zur Illustration der folgenden Interpolationen dient Abbildung 5 auf der hinteren Umschlaginnenseite.

- *Interpolation der grünen Pixel:* Da der Grünkanal bereits zur Hälfte vorhanden ist, werden zuerst die fehlenden grünen Pixel interpoliert. Die Interpolation unterscheidet zwei Fälle, je nachdem ob an der gesuchten Stelle bereits ein roter oder blauer Pixel bereits vorhanden ist (siehe Abb. 5a und 5b). Die nachfolgende Interpolation gilt für den Fall a mit vorhandenen roten Pixeln. Für den Fall b werden einfach die roten Pixel durch blaue ersetzt:

$$\widehat{G}_{x,y} = \left(\frac{G_{x-1,y} + G_{x+1,y}}{2} \right) + \left(\frac{2R_{x,y} - R_{x-2,y} - R_{x+2,y}}{4} \right)$$

- *Interpolation der roten und blauen Pixel:* Nachdem alle fehlenden grünen Pixel interpoliert worden sind, werden die roten und blauen Pixel interpoliert. Da sich die blauen Pixel nach demselben Verfahren wie die roten Pixel interpolieren lassen, beschreiben wir hier nur das Verfahren für die roten Pixel. Wir unterscheiden dabei drei Fälle (Abb. 5b, 5c, 5d). Im Fall b gibt es vier gleichfarbene Nachbarn:

$$\widehat{R}_{x,y} = \widehat{G}_{x,y} + \frac{(R_{x-1,y-1} - \widehat{G}_{x-1,y-1}) + (R_{x-1,y+1} - \widehat{G}_{x-1,y+1})}{4} + \frac{(R_{x+1,y-1} - \widehat{G}_{x+1,y-1}) + (R_{x+1,y+1} - \widehat{G}_{x+1,y+1})}{4}$$

Im Fall c sind die beiden nächsten roten Pixel oberhalb und unterhalb des zu interpolierenden Pixels vorhanden. Zum grünen Pixel an der Stelle werden die Differenzen zwischen dem roten und dem grünen Nachbarpixel addiert:

$$\widehat{R}_{x,y} = G_{x,y} + \frac{R_{x,y-1} - \widehat{G}_{x,y-1} + R_{x,y+1} - \widehat{G}_{x,y+1}}{2}$$

Der Fall d entspricht dem Fall c mit dem Unterschied, dass die beiden nächsten roten Pixel links und rechts des zu interpolierenden Pixels liegen:

$$\widehat{R}_{x,y} = G_{x,y} + \frac{R_{x-1,y} - \widehat{G}_{x-1,y} + R_{x+1,y} - \widehat{G}_{x+1,y}}{2}$$

Farbanpassungen

Nebst einem rausch- und artefaktfreien Bild ist die natürliche Farbwiedergabe ein wichtiges Merkmal eines „schönen“ Bildes. Die natürliche Farbwiedergabe wird durch Kontrast, Helligkeit, Farbsättigung und Gamma beeinflusst. Veränderungen dieser vier Bildeigenschaften sollen direkt in der Kamera und in Echtzeit erfolgen.

Der Kontrast, die Helligkeit sowie das Gamma können wie bereits erwähnt von der Preview-Engine des DMPs auf Basis der Rohdaten verändert werden. Die Farbsättigung des RGB-Zielbildes kann hingegen erst nach der Bayer-Pattern-Interpolation verändert werden, da die Sättigung durch die Interpolation beeinflusst wird.

Die Farbsättigung S entspricht im Wesentlichen dem Verhältnis von der kleinsten Farbkomponente zum Durchschnitt über die drei Farbkomponenten: $S = 1 - \min(R_{in}, G_{in}, B_{in})/avg$, wobei $avg = (R_{in} + G_{in} + B_{in})/3$ und $R_{in}, G_{in}, B_{in} \in [0,1]$. Bei einem reinen Grauton sind $R_{in} = G_{in} = B_{in}$ und somit ist das Minimum gleich dem Durchschnitt, was zu einer minimalen Sättigung von 0 führt. Primär- und Sekundärfarben haben mindestens eine Farbkomponente gleich 0 und die restlichen Farbkomponenten gleich 1. Daher ist das Minimum gleich 0 und der Durchschnitt grösser als 0, was zu einer maximalen Sättigung von 1 führt. Zwischen einem Grauton und einer voll gesättigten Farbe kann dann mit dem Parameter $s \in [0,1]$ linear interpoliert werden:

$$\begin{pmatrix} R_{out} \\ G_{out} \\ B_{out} \end{pmatrix} = avg + s \begin{pmatrix} R_{in} - avg \\ G_{in} - avg \\ B_{in} - avg \end{pmatrix}$$

Resultate

Zur Reduktion des Sensorrauschens entwickelten wir ein einfach zu bedienendes Hilfsprogramm für den Kamerahersteller, welches aus einer Serie von Referenzbildern die Korrekturkoeffizienten für die jeweilige Kamera berechnet. Diese Korrekturkoeffizienten werden anschliessend an die Kamera übertragen und sorgen dafür, dass bei jeder Aufnahme das kameraspezifische Rauschen reduziert wird. Die dadurch erreichte Erhöhung der Bildqualität lässt sich mit technischen Differenzmassen nur ungenügend messen, weil hierbei unklar ist, was genau als Referenz gelten soll. Daher beruft man sich auf die optische Kontrolle durch geschulte Experten.

Ähnlich ist es mit der Feststellung der Reduktion des Moiréeffekts. Wiederum lässt sich mit den üblichen Qualitätsmassen für Bildvergleiche, wie z.B. Color-Peak-Signal-to-Noise-Ratio (CPSNR) [CC06, PSNR], die Reduktion nicht adäquat erfassen und es wird vorwiegend auf eine optische Qualitätsmessung durch eine Fachperson zurückgegriffen. Bilder mit reduzierten Moiréeffekten können durchaus eine verminderte CPSNR gegenüber anderen mit Moiréeffekt haben. Das heisst, die Reduktion des Moiréeffekts führt nicht automatisch zu einer Erhöhung der CPSNR. Dies ist auch mit ein Grund dafür, warum die CPSNR zur Beurteilung der Bildqualität von verlustbehafteten Bildverarbeitungsmethoden umstritten ist.

Mit der Reduktion der Moiréeffekte durch unseren schnellen Bayer-Pattern-Interpolationsalgorithmus kann aber zweifelsfrei eine markante

Verbesserung in der optischen Bildqualität erreicht werden (vergleiche Abb. 6 auf der hinteren Umschlaginnenseite). Für den Fall, dass für eine nachgeschaltete Bildverarbeitung auf einem Rechner genügend Zeit vorhanden ist, so können auch die zeitaufwendigeren Varianten unseres Interpolationsalgorithmus eingesetzt werden, die eine noch stärkere Reduktion des Moiréeffekts gestatten.

Die zur Bayer-Pattern-Interpolation vor- und nachgeschalteten Farbanpassungen (Kontrast, Helligkeit, Gamma usw.) in der Kamera, können durch eine Software auf einem mit der Kamera verbundenen Rechner gesteuert werden. Dabei handelt es sich jedoch nicht um eine externe Bildnachbearbeitung, sondern lediglich um eine Parametrisierung der Kamera und ein Monitoring der resultierenden Bildqualität.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die von uns neu entwickelten Algorithmen und Software einerseits sehr effizient sind und andererseits den optischen Ansprüchen der Fachleute von AOS entsprechen. Das Projekt ist eine Erfolgsgeschichte für alle Beteiligten. Daher hat sich AOS dazu entschieden, diese Algorithmen in zukünftigen Kameras einzubauen.

Referenzen

- [Bay] Bayer-Sensor: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bayer-Sensor>
- [CC06] Color Demosaicing Using Variance of Color Differences, King-Hong Chung and Yuk-Hee Chan, IEEE, Oktober 2006. http://www.eie.polyu.edu.hk/~enyhchan/J-TIP-CDemosaicking_using_VarCD.pdf
- [DMP] DaVinci Digital Media Processor TMS320DM6437, Texas Instruments: <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tms320dm6437.html>
- [Fov] Foveon X3-Technologie: <http://www.foveon.com/article.php?a=67>
- [MT9M413] Micron 1.3 Megapixel CMOS active-pixel digital image sensor (MT9M413): <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/97416/MICRON/MT9M413C36STC.html>
- [Moi] Moiréeffekt: <http://de.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9-Effekt>
- [PSNR] Peak signal-to-noise ratio, Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Peak_signal-to-noise_ratio
- [Rau] Was sind die Ursachen von Bildrauschen: <http://www.fotos.docoer-dig.de/Bildrauschen.htm>
- [Sen] Allgemeine Informationen zu Bildsensoren: <http://www.fotos.docoer-dig.de/Bildsensoren.htm>



Abbildung 4: Entstehung eines Farbmoirés durch lineare Interpolation (Durchschnitt der 2 resp. 4 gleichfarbigen Nachbarpixel)

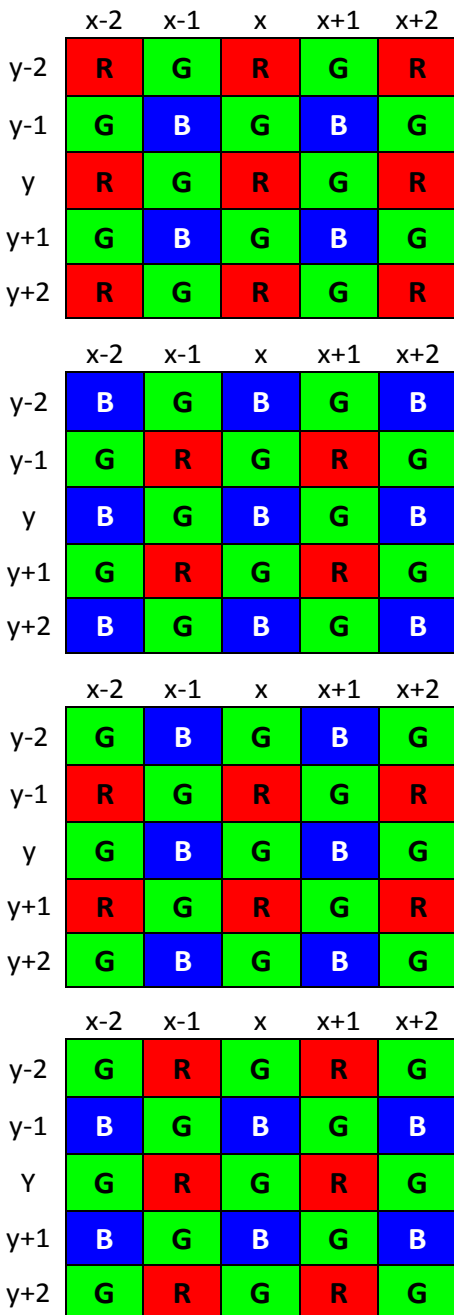


Abbildung 5: Vier unterschiedliche Interpolationsfälle a, b, c und d (von oben nach unten)

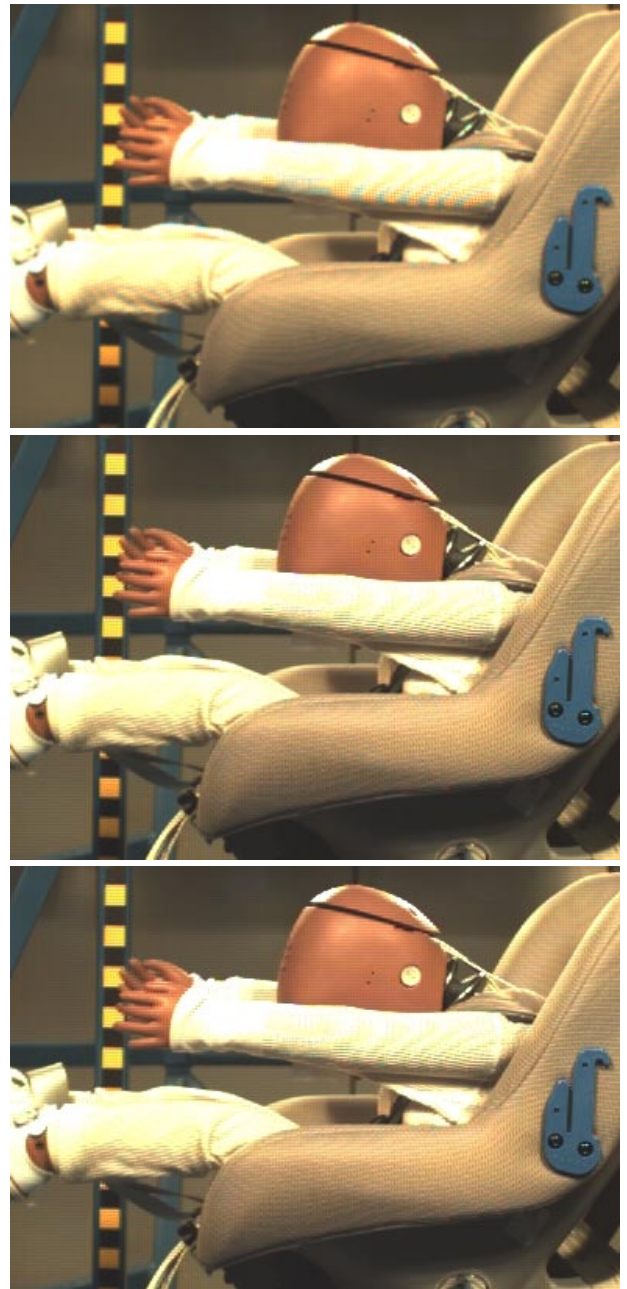


Abbildung 6: Ergebnisse drei verschiedener Bayer-Pattern-Interpolationen: ursprünglich verwendete Interpolation (oben), von uns entwickelte schnelle Interpolation direkt in der Kamera (Mitte), zeitaufwendige Post-Processing-Variante (unten)