Vorteile von Machine-Vision-Kameras in der Medizin

Eine Untersuchung mit Schwerpunkt auf Farbechtheit und CCD-/CMOS-Sensoren

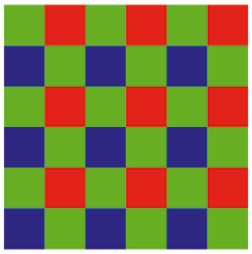


Bild 1: Bayer Pattern mit verschiedenen Filtern über den Pixeln eines Sensors. Jeweils 4 Pixel (Blau, 2x Grün, Rot) bilden ein Farbpixel.

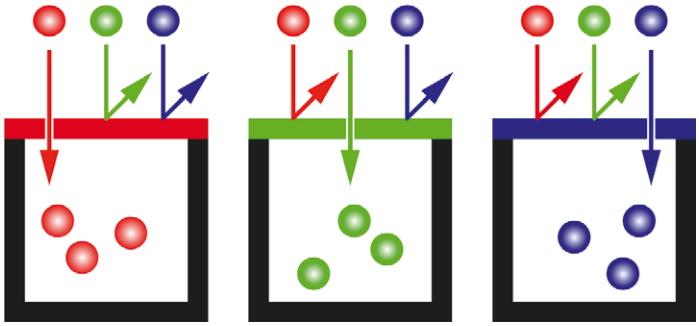


Bild 2: Die Pixel lassen jeweils nur Licht der bestimmten Wellenlänge für Rot, Grün bzw. Blau passieren. Photonen anderer Wellenlänge können nicht passieren.

Die Bedeutung von Kameras in der Medizin wächst seit Jahren stetig. Ob in Medizingeräten, der Laborautomation oder im Operationssaal: heutzutage lässt sich eine Vielzahl von Anwendungen finden, in der der Einsatz von Kameras eine wesentliche Komponente darstellt. Besonders wichtig sind Kameras in der Mikroskopie, der Ophthalmologie, der Pathologie, der Endoskopie, der Laborautomation, sowie in der biomedizinischen Forschung.
Zu Beginn dieses White Papers werden anhand der wichtigsten Kamerakriterien die Vorteile von Machine Vision (MV)-Kameras für medizinische Applikationen aufgezeigt. Anschließend soll insbesondere auf die Berechnung der Farbe und den Begriff der Farbechtheit eingegangen werden. Abschließend werden die Entwicklung von CCD- hin zu CMOS-Sensoren diskutiert, beide Sensortypen vorgestellt und die Vor- und Nachteile beider Technologien erläutert.

Auswahlkriterien für Kameras bei medizinischen Anwendungen

Die rasante endkundengetriebene Entwicklung neuer Sensor- und Interfacetechnologien hat einen Effekt auf die Entwicklung von medizinischen Produkten mit Kameras: Die Auswahl der richtigen Kamera für eine medizinische Anwendung wird bei der riesigen Auswahl und Sensoren und Interfaces immer schwieriger. Oft hängt die Entscheidung von einer Vielzahl an Faktoren ab, welche teils applikationsspezifisch, teils generell sind. Wesentliche Kriterien sind hierbei (1) Größe und Formfaktor, (2) Kamera-Umgebung, (3) Kamerasensor, (4) Interface, (5) Objektiv, (6) Langlebigkeit der Plattform und (7) Möglichkeit von speziellen Kundenanpassungen. Während es sich bei (1) – (5) um produktspezifische Anforderungen handelt, sind (6) und (7) Anforderungen an den Kamerahersteller. Der nachfolgende Text skizziert die wesentlichen Eigenschaften einer Kamera bei der Auswahl für eine medizinische Anwendungen und zeigt auf, dass Machine Vision-Kameras bei vielen dieser Faktoren entscheidende Vorteile gegenüber Kameras aus dem Konsumentengeschäft, sowie gegenüber firmenspezifischen Eigenentwicklungen mit selbst integrierten Sensoren liefern.

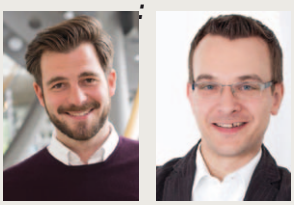
Größe und Formfaktor

Größe und Formfaktor ist eines der entscheidenden Kriterien für die Auswahl der Kamera. Wird die Kamera als externer Bildsensor benutzt, wie z.B. als OP-Überwachungskamera oder als Mikroskopie-Kamera, muss das Gerät in einem stabilen Gehäuse untergebracht sein. Ist die Kamera integraler Bestandteil eines Gerätes, führt limitierter Platzbedarf zu höheren Ansprüchen bezüglich Kompaktheit und Größe.
Auch das Interface und Kabelanschlüsse spielen hier eine Rolle. Seitliche USB-Anschlüsse benötigen bei der Verkabelung mehr Platz, während z.B. LVDS-basierte Interfaces mit ultraflexiblen Flachbandkabeln auch in sehr begrenztem Raum untergebracht werden können. Machine-Vision-Kameras liefern die nötige Robustheit, um im industriellen Umfeld zu bestehen. Anders als bei Kameras im Endverbraucherbereich werden zusätzlich Faktoren wie Sensorversatz, sowie Verformung der Kamera und damit des Field of View (FOV) in die Konstruktion einkalkuliert. Auf diese Weise ist die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Bilddaten in hohem Maße gewährleistet.

Kameraumgebung

Die Überlegung zur Kameraumgebung und den Einsatzszenarios ist ein weiterer kritischer Punkt im Entscheidungsprozess. Kameras werden häufig mit wechselnden Lichtbedingungen konfrontiert. Anstatt zwei Kameras zu nehmen, ist es mit Machine-Vision-Kameras möglich, die Kamera mit verschiedenen Softwareeinstellungen an verschiedene Umgebungsszenarien anzupassen. Typische MV-Kamera-Software stellt diese Features (Exposure Time, Trigger, White Balancing) zur Verfügung.

Autoren:



Peter Behringer und Dennis Dettmer, beide Product Market Manager bei der Basler AG.

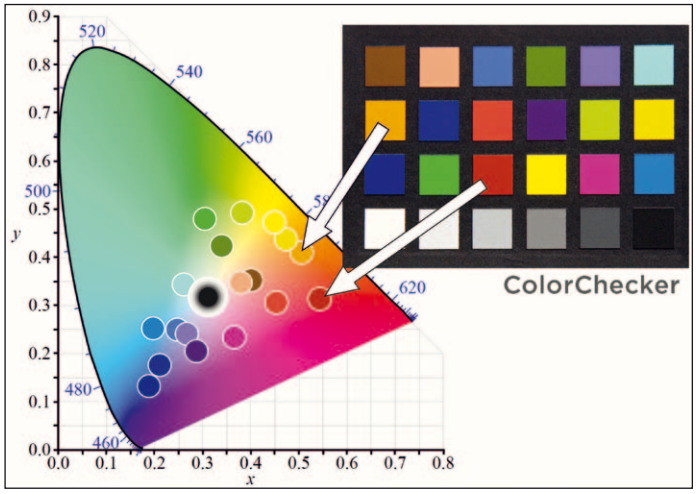


*Bild 3: ColorChecker mit 24 Farben und 6 Graustufen. sRGB-Werte des ColorCheckers im L*a*b*Farbraum (bzw. einer Ebene davon)*

Kamerasensor

Der Sensor stellt als optischer Sensor innerhalb der Kamera eine der wichtigsten Komponenten dar. Abhängig von dem zu untersuchenden Objekt muss der integrierte Sensor eine minimale Distanz auflösen können. Beim diagnostischen Einsatz von Kameras werden hohe Auflösungen bis zu 20 MP mit hochempfindlichen Sensoren verwendet.

Die Anzahl der benötigten Frames ist ebenfalls applikationsabhängig. Benötigt man Live-Bilder mit Nutzerinteraktion (z.B. in Mikroskopie-Kameras) werden typischerweise Sensoren mit 25 - 30 fps für eine flüssige Bildwiedergabe eingesetzt. Für fixierte Proben, die untersucht und analysiert werden, ist die Bildrate nicht kritisch.

Sensortyp

Stattdessen sind hier andere Entscheidungskriterien von Relevanz, wie z.B. der Sensortyp. Für die meisten Applikationen (z.B. für Refraktometer in der Ophthalmologie) ist ein Monosensor die richtige Wahl. Für einige Anwendungen, wie z.B. die Aufnahme von Bildern des Augenhintergrundes (Fundus) ist die Farbe des zu untersuchenden Objekts ein wichtiges Kriterium im Analyseprozess. Dies trifft besonders auf diagnostische Applikationen (z.B. in der Ophthalmologie, Pathologie oder Dermatologie) zu. Hierbei ist insbesondere die korrekte Farbwiedergabe der Kamera ein besonders wichtiges Kriterium – worauf in diesem White Paper eingegangen werden soll.

In Applikationen mit wenig Lichtstärke (z.B. Fluoreszenz) sind Sensoren besonders gefordert: Gute Quanteneffizienz, geringer Dunkelstrom und kleines Ausleserauschen sind Eigenschaften, die einen geeigneten Sensor ausmachen. Geringes Rauschen und Pixel mit einer großen lichtempfindlichen Fläche kommen bei Anwendungen mit wenig Licht als zusätzliches Entscheidungskriterium hinzu.

Breites Spektrum

Hersteller von Machine-Vision-Kameras bieten in der Regel ein breites Spektrum an Sensoren für ihre Kameras an - in manchen Fällen gleiche Sensoren mit unterschiedlichen Interfaces. Das erleichtert die Entwicklung dahingehend, dass die Kamera nicht erst für die Anwendung entwickelt werden muss, und somit Entwicklungskosten sowie Time-to-Market (TTM) klein und effizient gehalten werden können. Ein weiterer Pluspunkt im Vergleich zu Kameras aus dem Konsumentenbereich ist die Bildqualität. Machine-Vision-Kameras haben ein eigenes, über Jahre ausgereiftes Pre-Processing auf einer Recheneinheit direkt in der Kamera. Wenn erwünscht, übernimmt diese Einheit rechenintensive Operationen wie Debayering, Denoising sowie Korrekturalgorithmen. Da es sich bei der Recheneinheit in den besten Fällen um einen FPGA (Field Programmable Gate Array) handelt, werden die Bilddaten ohne jegliche Verzögerung über das Interface weitergeleitet.

Transparenz der Parameter

Ein großer Pluspunkt von MV-Kameras ist die Transparenz der Parameter. Während bei Kameras im Konsumentengeschäft das Auslesen des Sensors in vielen Fällen eine Black Box mit viel Post-Processing ist, haben Entwickler mit MV-Kameras die völlige Kontrolle über die Kameraeinstellungen.

Ein weiterer, äußerst wichtiger Punkt: Machine-Vision-Kamerasensoren sind für einen 24-Stunden Betrieb ausgelegt. Während herkömmliche Kameras nach einigen Stunden Dauerbetrieb bereits Funktionseinschränkungen wie Bildfehler oder Kameraaussetzer zeigen, können MV-Kamerasensoren über Jahre hinweg betrieben werden, ohne Einschränkungen zu zeigen.

Interface

Gigabit Ethernet (GigE) ist das meistverkaufte Interface für Machine-Vision-Kameras. In medizinischen Anwendungen ist GigE aufgrund langer Kabellängen und bekannter Netzwerkarchitektur ebenfalls beliebt. In den letzten Jahren hat außerdem USB3 durch einfachen plug-and-play Anschluss an Beliebtheit gewonnen. Die Hersteller der Machine-Vision-Industrie haben für GigE und USB3 eigene, speziell auf die Übertragung von Bilddaten angepasste Standards entwickelt: GigE Vision und USB3 Vision. Diese Protokolle sind wesentlich schlanker, stabiler und können Bilddatenströme schneller übertragen.

Bildverarbeitungsumgebung

Bei kleineren, portablen Geräten ist nicht nur die Bandbreite ein wesentlicher Aspekt bei der Auswahl des Interfaces, sondern auch die Bildverarbeitungsumgebung. Bei Stereo-Applikationen beispielsweise, werden LVDS-basierte Interfaces bevorzugt. Diese können direkt auf dem Prozessorboard des Kunden in eine Recheneinheit (wie z.B. einen FPGA) integriert werden, und so eine bestimmte Rechenaufgabe sehr schnell lösen – ohne zusätzlichen CPU-Aufwand zu generieren. Bei LVDS-basierten Interfaces kommen außerdem Flachbandkabel zum Einsatz. Diese sind äußerst flexibel und daher auch für den Einbau in Geräten mit geringem Platzbedarf geeignet.

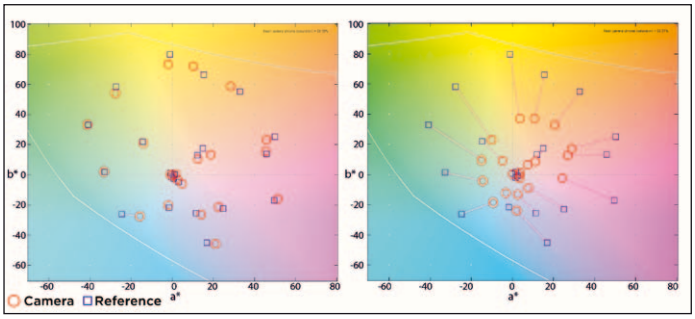


Bild 4: Die Länge des Vektors zwischen dem gemessenen Punkt (runder Punkt, Kamera) und dem gemessenen Punkt (Viereck, Reference) wird als Farbfehler ΔE bezeichnet. Mithilfe der Farbkalibrierung wird der Farbfehler auf ein Minimum begrenzt.

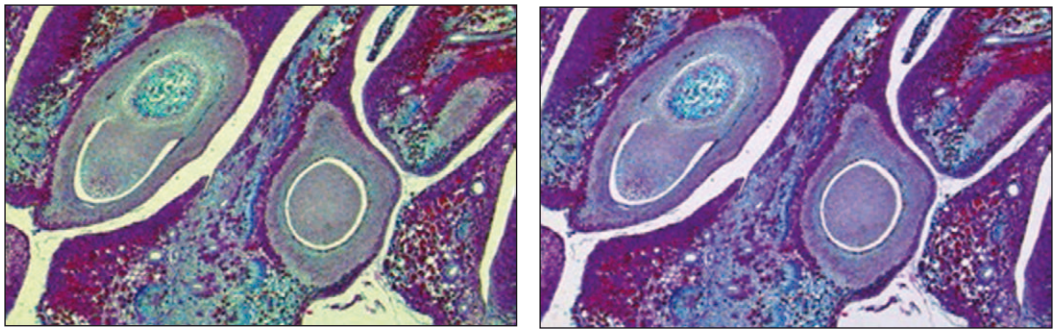


Bild 5: Effekt des Weißabgleichs. Livebild einer Basler Mikroskopie-Kamera pulse puA2500. Links: Vor dem Weißabgleich. Rechts: Nach automatischem Weißabgleich

Objektiv

Typischerweise wird erst nach erfolgreichen Spezifikationen für die Kamera, dem Licht, der Prozessoreinheit, sowie der Algorithmen nach den Anforderungen des Objektivs gesucht. Die Produktion von maßgeschneiderten Objektiven dauert oft Jahre – daher ist es wichtig, die Auswahl des Objektivs bereits früh in der Entwicklungsphase unterzubringen. Einige Hersteller von MV-Kameras bieten passende Objektive, sowie entsprechende Kabel direkt mit an. Dieses „one-stop-shopping“ spart Zeit, wichtige Entwicklungsressourcen, und es minimiert das Risiko von Zuliefererproblemen.

Langlebigkeit der Plattform

Die Langlebigkeit der Plattform ist einer der wesentlichen Aspekte in der Entscheidung für die Kamera eines Herstellers. Besonders bei Anwendungen im Bereich der Chirurgie, Ophthalmologie und medizinischen Diagnostik, sind aufgrund langwieriger Zertifizierungen (ISO, FDA) Produktzyklen bis zu zehn Jahren keine Seltenheit. Daher ist es umso wichtiger, dass der Kamerahersteller sein Zulieferernetz so ausgerichtet hat, dass er die Produkte entsprechend lange anbietet. Dieses Kriterium ist so maßgeblich, dass Hersteller von Medizinprodukten ein langfristig verfügbares Produkt einer technischen Neuheit vorziehen.

Individuelle Kundenanpassungen

Machine-Vision-Kameraherstellen sind es gewohnt, Kameras an Kundenwünsche anzupassen. Diese Flexibilität ist insbesondere im Medizinbereich von enormer Wichtigkeit. Wird ein Produkt beispielsweise als Medizinprodukt zertifiziert, muss die Firmware entsprechend des Standes für den Kunden eingefroren und neue Kameras - entsprechend dieser Firmware - an den Kunden ausgeliefert werden. Oft müssen Kameras auch in standardisierte medizinische Gehäuse integriert werden, was kundenspezifische Anpassungen in Bezug auf Materialien, Labels oder Farben mit sich bringt.

Zusammenfassung

Machine Vision-Kameras und Hersteller eignen sich also hervorragend für den medizinischen Markt:

1. Langlebige Kameras: stabiles Gehäuse, geringer Sensorversatz, gute Verarbeitung
2. Stabile und gepflegte Software mit Features zum Anpassen der Kamera an verschiedene Licht/-Applikationsszenarien – bei hoher Transparenz der eingesetzten Methoden (keine Black-Box wie bei Kameramodulen im Konsumentenbereich)
3. Breite Sensor- und Interfaceauswahl, zusammen mit gutem Support sorgen für schnelle und effiziente Integration sowie kurze Time-to-Market
4. Machine-Vision-Kameras liefern ein akkurates, belastbares, reproduzierbares Bild mit echten Farben vom Objekt, während Kameras aus dem Konsumentenbereich die Bilder schönrechnen
5. CMOS-Sensoren sind mittlerweile kostengünstige Alternativen zu CCD-Sensoren
6. Machine-Vision-Kameras haben GigE- und USB-3.0-Interfaces, die auf Bildübertragung spezialisiert sind
7. Neue Interfacetechnologien wie LVDS ermöglichen Vision-Systeme auf engstem Raum (z.B. tragbare Geräte, Stereo-Vision)
8. One-stop-shopping: Kamera, Objektiv und Kabel aus einer Hand zur Minimierung von Zuliefererproblemen
9. Langlebigkeit von Software- und Hardware-Plattformen über viele Jahre hinweg können Hersteller von Machine-Vision-Kameras anbieten
10. Service wie kundenspezifische Anforderungen (Farbe, Label, Materialien..) können realisiert werden

Farbechtheit bei Kameraanwendungen in der Medizin

Besonders in wachsenden Märkten der medizinischen Diagnostik, wie z.B. der digitalen Pathologie, der Ophthalmologie, der Hämatologie oder der Mikroskopie ist die Farbwiedergabe der Kamera von zentraler Bedeutung. Mithilfe der digitalen Pathologie können Abbildungen von Präparaten zwischen verschiedenen Labors ausgetauscht werden. Die Diagnose wird auf diese Weise kostengünstiger, effizienter und robuster, da Experten hunderte Kilometer entfernt Zugang zu den Präparaten erhalten. Mithilfe einer Software lassen sich die digitalisierten Präparate ansehen und kommentieren. Außerdem kann die Probe – einmal digitalisiert – von Algorithmen auf verdächtige Regionen untersucht werden. Diese sog. computergestützte Diagnostik, die auf Mustererkennungs-Algorithmen wie neuronalen Netzen beruht, hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht und wird auch weiter an Bedeutung gewinnen. Dieses Verfahren macht Diagnosen verlässlicher und spart zudem Kosten und Zeit, da Präparate vorqualifiziert werden können. Da die Farbe bestimmter Strukturen des Präparates für den geschulten Pathologen ein aussagekräftiges Merkmal zur Klassifikation der Diagnose ist, ist die Anforderung an die Kamera hoch, dass die digitale Version des tatsächlichen Präparates seinem Ebenbild in Detail und Farbton entspricht.

Bei der digitalen Dermatoskopie werden potentiell schädigende Strukturen der Haut mit einer Kamera aufgenommen. Herkömmliche optische Dermatoskope erlauben zwar die Beurteilung von tumorverdächtigen Stellen – liefern jedoch keine Möglichkeit zur standardisierten Dokumentation oder der quantifizierten Beobachtung über die Zeit. Bei einer digitalen dermatoskopischen Untersuchung werden verdächtige Hautveränderungen mit einer Kamera abfotografiert. Dies geschieht zu mehreren Zeitpunkten, sodass die Entwicklung des Pigments digital festgehalten werden kann. Eine Software speichert die Bilder und stellt sie für den Dermatologen übersichtlich dar. Verschiedene Kriterien, wie Radius und Farbe, liefern dem Dermatologen dann eine Entscheidungsgrundlage zur Diagnose. Die Farbechtheit ist somit auch hier ein wesent-

licher Aspekt im diagnostischen Prozess und stellt eine Anforderung an die Kamera dar. Speziell in der digitalen Dermatoskopie ist das nicht trivial – denn die Farbdarstellung muss unabhängig von der Beleuchtungsart und Lichtfarbe stets gleich sein.

Viele einzelne Pixel

Der Sensor besteht aus vielen einzelnen Pixeln, welche die eintreffenden Photonen des Lichts aufnehmen können und je nach Anzahl ein unterschiedlich starkes elektrisches Signal weiterleiten. Die einzelnen Pixel lassen sich bildlich als „Eimer" verstehen, welche die eintreffenden Photonen aufnehmen können. Um nicht nur die Anzahl der Photonen, sondern auch noch ihre spektrale Zugehörigkeit (Wellenlänge) unterscheiden zu können, ist bei Farbsensoren eine Filterschicht (sog. Bayer-Pattern oder Bayer-Matrix) angebracht (Bild 1), die Photonen einzelner Wellenlänge passieren lassen (Rot, Grün, Blau), während sie Photonen der jeweils anderen Wellenlänge blocken (Bild 2). Das Design des Bayer-Patterns kann zwischen Bauarten von Sensoren zwar variieren – üblicherweise besteht das Muster jedoch aus drei Arten von Filtern: 50% grün, 25% rot und 25% blau.

Vom Objekt zum Messwert: Abbildung von Farbe bei digitalen Kameras

Die beschriebenen Applikationen zeigen beispielhaft, dass Kameras als Werkzeug zur Dokumentation, zur visuellen Unterstützung, sowie als Messgerät verwendet werden, und die Anforderungen an Farbgenauigkeit für digitale Kameras in medizintechnischen Anwendungen überaus hoch sind. Um den Prozess der Farbwiedergabe eines Objekts zu beschreiben, muss man den Prozess der Farbe des Objekts bis zum Intensitätswert eines Bildes betrachten: Dieser Weg geht vom Objekt über das Objektiv zum Sensor, und wird in der Kamera zum Farbwert verarbeitet.

Bei der Bildakquirierung fällt zunächst das vom Objekt reflektierte Licht über ein Objektiv auf den Sensor der Kamera. Allen drei Komponenten fällt eine entscheidende Bedeutung zu: Je besser die Beleuchtung des Objekts, desto exakter kann der Sensor die Farbintensität messen. Da das reflektierte Licht über ein Objektiv auf den Sensor projiziert wird, ist auch dieses von besonderer Bedeutung.

Berechnung des RGB-Wertes

Im folgenden Schritt müssen aus den Intensitätswerten der einzelnen Farbpixel die Farbwerte errechnet werden. Ziel ist es, die Intensitätswerte des Bayer-Pattern (bspw. 8 bit pro Pixel) auf eine RGB-Information (24 bit pro Pixel – 8 rot, 8 grün, 8 blau) hochzurechnen. Dieser Vorgang ist unter dem sog. Debayering bekannt und entspricht einer Interpolation (Rückschließen) der fehlenden Farbwerte. Ein Debayering ist rechenaufwändig. Moderne Kameras realisieren diesen Rechenvorgang deshalb direkt auf dem kamerainternen FPGA. Das erspart dem Anwender viel Rechenleistung, die aufgrund stark begrenzter Ressourcen besonders im Embedded-Bereich von großer Bedeutung ist. Durch die Nutzung eines FPGA ist außerdem die Latenzzeit für die Berechnung auf ein Minimum begrenzt.

Ein großes Problem bei der Verwendung farbiger medizinischer Bilder ist die uneinheitliche Farbdarstellung, denn diese kann je nach eingesetzter Kamera bzw. Sensor stark variieren. Aus diesem Grund gibt es den standardisierten sRGB-Farbraum. Besonders in der Medizin, in der die standardisierte Dokumentation von großer Relevanz ist, ist der sRGB der Grundpfeiler in standardisierter Farbwiedergabe. sRGB sorgt dafür, dass Bilddaten, die in sRGB gleich sind, auf jedem farbkalibriertem sRGB-Monitor auf der ganzen Welt gleich aussehen. Für eine Überführung der kameraspezifischen RGB-Werte in die genormten sRGB-Werte sind zwei Korrekturen innerhalb der Kamera nötig: Farbkalibrierung und Gammakorrektur.

Farbkalibrierung

Wie oben beschrieben, hängen die von der Kamera erzeugten Farbwerte zu großen Teilen von den Faktoren Beleuchtung, Objektiv, Sensor und Interpolation (Debayering) ab. Damit sich die medizinische Diagnostik auf die errechneten Farbwerte verlassen kann, sind eine Reihe von Schritten nötig, um diese Anpassung der Farbe auf das reale Objekt sicherzustellen – die Farbkalibrierung. Sie besteht in modernen Kamerasystemen aus drei Teilschritten: dem Weißabgleich, einer sog. Matrix-Korrektur, sowie einer Korrektur mit einem Sechs-Achsen-Operator. Abschließend wird eine sog. Gammakorrektur durchgeführt, die nicht als Schritt der Farbkalibrierung gezählt werden kann.

ColorChecker

Der Kalibrierungsprozess bedient sich eines sogenannten ColorCheckers (Bild 3, rechts). Hierbei handelt es sich um eine schachbrettähnliche Tafel, auf der 18 Farben und 6 Graustufen in Vierecken nebeneinander abgebildet sind. Da die sRGB-Werte der einzelnen Felder bei bestimmter Beleuchtung bekannt sind (Bild 3, links), dient der ColorChecker als Referenz zum Farbmesswert der Kamera. Misst man den Farbwert der Kamera für ein bestimmtes Feld, erhält man einen sRGB-Wert, den man mit dem tatsächlichen, bekannten Wert für das Farbfeld vergleichen kann. Die Länge des Vektors zwischen gemessenem und bekanntem Punkt im Farbraum wird als ΔE (siehe Bild 4) bezeichnet und kann als Farbfehler definiert werden. Ein ΔE von 1 wird als just noticeable difference (JND) bezeichnet. Ein ΔE von größer als 1 wird als unterschiedliche Farbe wahrgenommen. Ziel des nun folgenden Kalibrierungsprozesses ist es, den Farbfehler ΔE zu minimieren. In der Vergangenheit gab es verschiedene Möglichkeiten, den Farbfehler ΔE zu berechnen. Während das in den 70ern definierte ΔE_{ab} wie oben beschrieben die euklidische Vektordistanz misst, berechnen neuere Definitionen wie ΔE94 oder

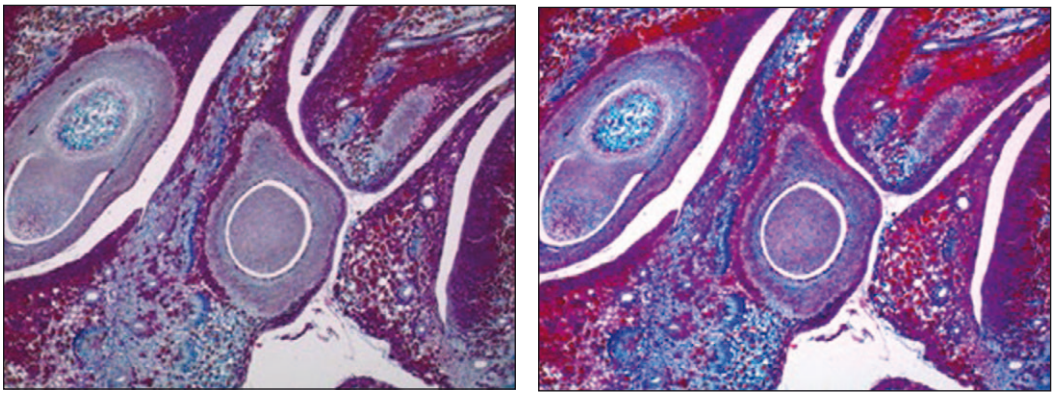


Bild 6: Erhöhung der Sättigung bei einer Liveaufnahme zellulärer Strukturen mit einer Mikroskopie-Kamera (Basler pulse puA2500)

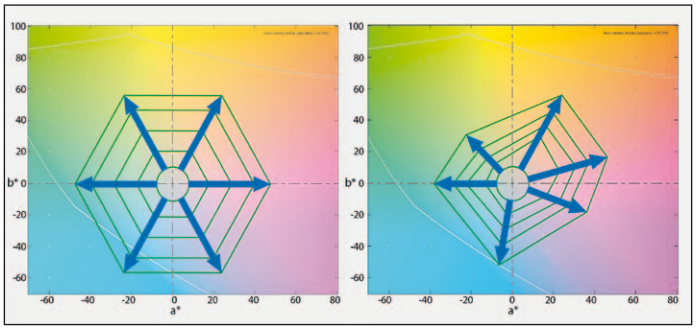


Bild 7: Visualisierung von Operationen in einer Ebene des L*a*b Farbraums. Links: Während es sich bei Hue und Sättigung um globale Operationen der Punkte im Farbraum handelt (anders formuliert: eine Änderung der Sättigung hat Einfluss auf alle Farbpunkte gleichermaßen), lassen sich mithilfe des Sechs-Achsen-Operators (rechts) einzelne Farben des Farbraums an eine andere Stelle transformieren – ohne andere Farben zu verändern

ΔE_{00} die menschliche Wahrnehmung genauer in den Abstand der Punkte mit ein.

Weißabgleich

Der Weißabgleich dient dazu, die Kamera auf die Farbtemperatur des Lichts am Aufnahmeort abzustimmen. Hierfür werden die Graustufen-Felder des ColorCheckers verwendet. Auch das menschliche Auge führt eine Art Weißabgleich durch – die sog. Chromatische Adaption. Diese erlaubt dem Menschen, einen Wechsel der Farbtemperatur des Umgebungslichts subjektiv kaum wahrzunehmen. Ein weißes Blatt Papier sieht daher unter Tageslicht annähernd so aus wie unter Kunstlicht.

Ein Weißabgleich lässt sich auf verschiedene Art und Weise durchführen. Die wohl simpelste Möglichkeit ist durch Einbinden des Nutzers, in dem dieser einen weißen Bereich in einem Viewer auswählt. In vielen Anwendungen muss der Weißabgleich jedoch automatisch passieren. Hierbei verwendet man Verfahren, wie z.B. das sehr einfache Grey World Verfahren. Dieses nimmt an, dass in einem normalen Foto der Durchschnitt aller Farben Grau ergibt. Nun lässt sich der Unterschied zwischen Grau und dem errechnen Farbdurchschnitt bestimmen. Die Farbkanäle werden multipliziert, sodass bei weißen Flächen R=G=B gilt.

Matrixkorrektur

Die Matrixkorrektur wird verwendet, um die spektrale Empfindlichkeit der Farbpixel im Sensor jener der Augenrezeptoren des Menschen anzupassen. Da der RGB-Farbwert aus drei Werten für Rot, Grün und Blau besteht, wird dieser mit einer 3x3 Farbmatrix multipliziert, um den korrigierten Farbton zu errechnen. Das Ergebnis der Matrixkorrektur ist die Überführung des kameraspezifischen RGB-Werts in den genormten sRGB-Wert.

Hue, Sättigung

Bei der Entwicklung von Vision-Systemen in der Medizin müssen die Bilder nicht immer nur einen möglichst kleinen Farbfehler aufweisen, sondern in manchen Fällen auch schlichtweg ästhetisch aussehen. Insbesondere wenn die Kamera nicht als Mess-, sondern als fotografisches Element genutzt wird, wie z.B. in der makroskopischen Beobachtung zellulärer Strukturen, wünschen sich Anwender oft ein farbenprächtiges Bild. Hier kommen Funktionen wie Hue und Sättigung zum Einsatz.
Im Farbraum entspricht die Erhöhung der Sättigung (Bild 6) einer Verschiebung der Farbpunkte an den äußeren Rand des Raumes (Bild 7, rechts). Im Gegensatz dazu bewirkt eine Veränderung des Hue eine Rotation der Farbpunkte (Bild 7, links). Es ist wichtig zu verstehen, dass Sättigung und Hue globale Operationen sind. Das bedeutet, eine Änderung wirkt sich auf alle Farben in gleichem Maße aus.

Sechs-Achsen-Operator

Im Gegensatz zu Hue und Sättigung ist der Sechs-Achsen-Operator keine globale Operation. Das bedeutet, es wird nun möglich, einzelne Farben im Farbraum zu bearbeiten – ohne dass andere Farben davon betroffen sind.

In bestimmten Applikationen (z.B. bei der Fundus-Fotografie) sind Anwender auf spezielle Farbeindrücke geschult, oder durch langjährige Erfahrung an sie gewöhnt. Mit Hilfe des Sechs-Achsen-Operators lässt sich in diesem Schritt die Farbrepräsentation an diese persönlichen Vorlieben anpassen. Dies hat u.a. große Bedeutung bei der Entwicklung eines neuen Gerätes, bei der zwar die Kamerakomponente ersetzt wird, der Bildeindruck jedoch der gleiche bleiben soll.
Weiterhin ist es durch den Sechs-Achsen-Operator möglich, die Unterschiedlichkeit zweier Farben (zum Beispiel bei der Untersuchung zwei sehr ähnlicher Rottöne) zu vergrößern. Statt Hellrot und Dunkelrot kann der Beobachter auf diese Weise Gelb und Magenta vergleichen.

Gammakorrektur

Im Unterschied zum menschlichen Auge nimmt der Kamerasensor Helligkeit als lineare Größe auf. Das bedeutet, wenn doppelt so viele Photonen auf dem Sensor auftreffen, ist der gemessene Intensitätswert auch doppelt so hoch. Evolutionsbedingt nimmt das menschliche Auge hingegen Unterschiede in der Helligkeit nichtlinear wahr. Unterschiede in der Helligkeit in dunklen Bereichen werden stärker wahrgenommen, als in hellen Bereichen. Um die Aufnahme an das Wiedergabegerät anzupassen, wird deshalb die Gammakorrektur durchgeführt. Sie entspricht einer Potenzierung der Intensitätswerte mit einer Kurve, welche die Helligkeitsunterschiede für dunkle Bereiche vergrößert und für helle Bereiche verkleinert. Ziel ist, dass die Linearität der Grauwerte auf dem Monitor wieder erreicht wird. Da auf dem Übertragungsweg das Bild mit konvexer Nichtlinearität konfrontiert wird, multipliziert man das Bild im Vorfeld mit einer konkaven Nichtlinearität, um diesen Effekt auszugleichen (Bild 8, unten).

Farbkalibrierung in der Praxis

Modernste Kameras sind mit vordefinierten Farbkalibrierungen (Weißabgleich, Matrixkorrektur und Sechs-Achsen-Operator) versehen. Diese Einstellungen sind bereits auf spezielle Szenarien (Daylight 5000 Kelvin, Daylight 6500 K und Tungsten 2500 K) vorkalibriert, und können für diese Kameraumgebung out-of-the-box verwendet werden. Möchte der Anwender die Farbkalibrierung speziell für sein Vision-System mit spezieller Beleuchtung durchführen, liefern einige wenige Kamerahersteller die dazu nötige Software.
Industriekameras ohne Farbkorrektur haben typischerweise einen Farbfehler von 10 bis 20. Dank der Farbkalibrierung schaffen moderne Kameras ein ΔE von 3 bis 4, was dem hohen Standard in der Medizin gerecht wird.

Zusammenfassung Farbtreue

- Wichtig für Farbtreue sind die Beleuchtung, der Sensor und die Farbkalibrierung.
- Preprocessing wie Debayering, Weißabgleich, Gammakorrektur, Matrixkorrektur und Sechs-Achsen-Operator kann den Farbfehler minimieren oder Farben an bisherige Farbprofile anpassen (z.B. bei Produktentwicklungen,

die bestehende Vision- Systeme ersetzen).

- Gemessen wird mit Farbfehler ΔE ; ΔE 3 bis 4 gilt als sehr gut.
- Die Vorkalibrierung an definierte Lichttemperaturen senkt den Integrationsaufwand für Standard-
- Kalibrierung der Farbmatrix kann auch vom Kunden für sein System angepasst werden.
- Debayering auf FPGA spart Rechenressourcen auf Host-Seite.

Wechsel von CCD- zu CMOS-Sensortechnologie

Auf dem Markt gibt es zwei Arten von Bildsensoren für Industriekameras, CCD- und CMOS-Sensoren. Der Trend hat schon lange darauf hingedeutet, dass die CMOS-Sensortechnologie in Zukunft die Nase vorne haben wird, denn besonders bei zwei wichtigen Eigenschaften von Flächen- und Zeilenkameras - der Geschwindigkeit und den Rauscheigenschaften - haben sich CMOS-Sensoren in den letzten Jahren entscheidend verbessert. Zudem ist die CMOS-Technologie kostengünstiger, wodurch sich Einsparungen für immer günstiger werdende Systeme erzielen lassen.

Was unterscheidet die beiden Sensortechnologien?

Auf dem Markt existieren sowohl CCD (charge coupled device)- als auch CMOS (complementary metal oxide semiconductor) - Bildsensoren. Ihre Aufgabe ist es, Licht (Photonen) in elektrische Signale (Elektronen) umzuwandeln. Die Informationen werden jedoch von beiden Sensortypen auf unterschiedliche Art und Weise weitergeleitet und auch der Aufbau ist grundverschieden.

Aufbau eines CCD-Sensors

Beim CCD-Sensor werden die Ladungen der lichtempfindlichen Pixel verschoben und ausgelesen. Die Ladungen, die durch Belichtung auf einem Halbleiter entstanden sind, werden mit Hilfe sehr vieler kleiner Verschiebe-Operationen (vertikale und horizontale Schieberegister), ähnlich wie in einer „Eimerkette", zu einem zentralen Analog/Digital-Wandler transportiert. Die Ladungsverschiebung der Ladungen wird mit Hilfe von elektrischen Feldern erzwungen, die über Elektroden im Sensor erzeugt werden.

Das Verschieben der Ladung im CCD-Sensor erfordert viel Zeit. Das ist insbesondere ein Nachteil bei hochauflösenden Sensoren, bei denen die Ladung aufgrund der großen Zahl an Pixeln über viele Verschiebeoperationen dem zentralen Verstärker zugeführt werden muss. Das setzt der maximalen Bildwiederholrate enge Grenzen.

Aufbau eines CMOS-Sensors

Beim CMOS-Sensor ist zu jedem einzelnen Pixel ein Kondensator als Ladungsspeicher parallel geschaltet. Dieser wird bei Belichtung des Pixels durch deren Fotostrom aufgeladen. Die erzeugte Spannung ist proportional zur Helligkeit und zur Belichtungszeit. Im Gegensatz zu CCD-Sensoren werden die bei der Belichtung im Kondensator angesammelten Elektronen nicht zu einem einzigen Ausleseverstärker verschoben, sondern direkt am Entstehungsort über eine eigene, dem Bildelement zugeordnete, Elektronik in eine messbare Spannung umgewandelt, die dem Analogsignalprozessor zur Verfügung gestellt wird. Jedes Pixel kann mittels zusätzlicher Elektronik einzeln ausgelesen werden, ohne dass wie beim CCD Ladung verschoben werden muss. Dies führt dazu, dass die Bildinformation sehr viel schneller ausgelesen werden kann als beim CCD-Sensor und dass Artefakte bei Überbelichtung, wie z.B. Blooming und Smearing deutlich geringer ausfallen, bzw. gar nicht vorhanden sind. Der Nachteil ist, dass die zusätzlichen Halbleiterelemente Platz benötigen, der als lichtempfindliche Fläche nicht zur Verfügung steht. Der Anteil der lichtempfindlichen Fläche an der Sensorfläche (über den Füllfaktor definiert) ist also kleiner als beim CCD-Sensor. Theoretisch kann man dadurch weniger Photonen für die Bildinformation einsammeln. Es gibt jedoch Methoden, diesen Nachteil abzumildern. CMOS-Sensoren können eine höhere Full-Well-Kapazität haben. Die Full-Well-Kapazität ist die maximale Anzahl an Elektronen pro Pixel. Oft wird diese künstlich begrenzt auf eine reduzierte Sättigungskapazität.

Bezüglich der Dynamik gilt daher, dass der CMOS-Sensor das, was er auf der Seite der Empfindlichkeitsschwelle gegenüber dem CCD-Sensor verliert, bei der Sättigungskapazität wieder wettmacht. So liegen CMOS und CCD nahezu gleichauf, was die Dynamik angeht.

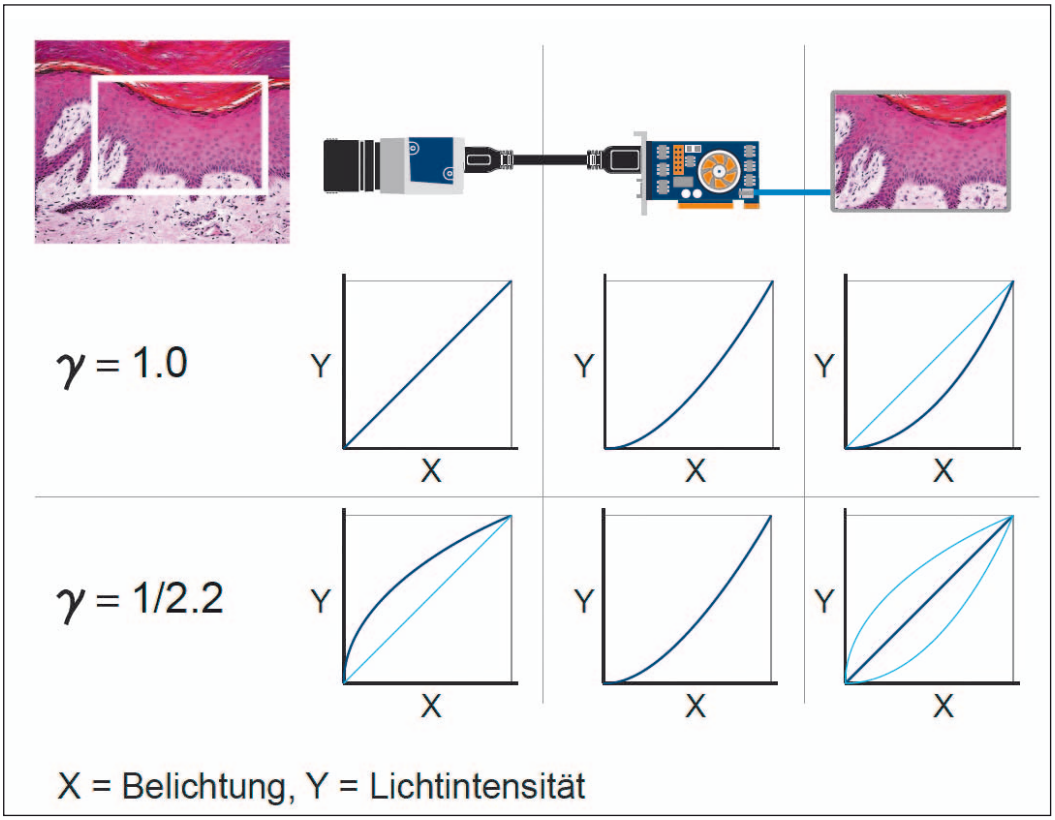


Bild 8: Visualisierung der Gammakorrektur. Das aufgenommene Bild muss gammakorrigiert werden, damit die inverse Gammakurve der Übertragung ausgeglichen werden kann und das Bild letztlich einen linearen Verlauf auf dem Monitor erzeugt

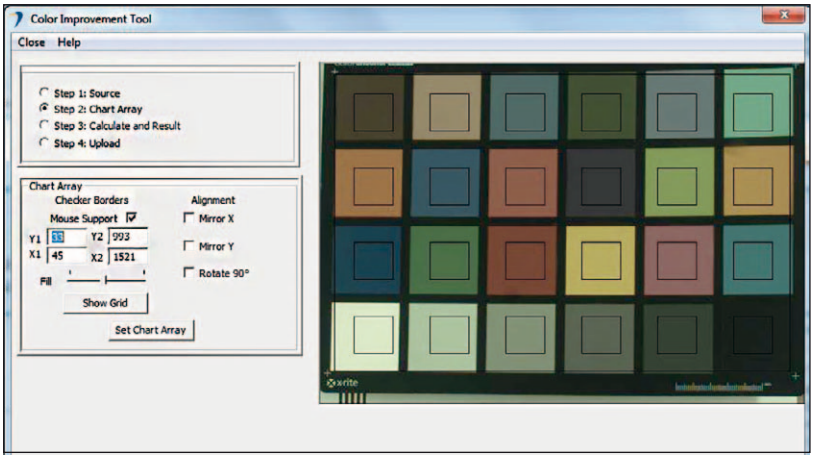


Bild 9: Color Improvement Tool. Das Software Framework bekommt als Eingabe ein unkalibriertes Kamerabild, das den ColorChecker abbildet. Der Farbfehler wird errechnet und Parameter für Weißabgleich, Matrixkorrektur und Sechs-Achsen- Operator dahingehend optimiert, dass der Fehler minimal wird. Die Parameter können dann direkt an die Kamera übertragen werden

CMOS-Sensoren haben eine jüngere Entstehungsgeschichte als CCD-Sensoren, sind aber inzwischen ebenfalls technisch voll ausgereifte Produkte und stellen in manchen Anwendungen sogar die bessere Alternative dar. Unterschiedliches Ausleseverhalten von Pixeln bei CCD und CMOS

Vorteile der CMOS-Technologie für Medical- und Life Science-Applikationen

Wie beschrieben, haben CMOS-Sensoren in den letzten Jahren im Vergleich zu CCD-Sensoren aufgeholt und eine grundlegende Weiterentwicklung erfahren. Inzwischen haben sie dank ihrer hohen Geschwindigkeit (Bildrate) und Auflösung (Anzahl der Pixel), ihrer geringen Leistungsaufnahme und wegen der inzwischen verbesserten Rauscheigenschaften und Quanteneffizienz ihren Weg in Bereiche gefunden, die vorher CCD-Sensoren vorbehalten waren. Die Verbesserungen in der CMOS-Technologie und das gute Preis-Leistungs-Verhältnis dieser Sensoren machen CMOS-Sensoren immer attraktiver für Anwendungen im Bereich Medical und Life Science.

Bereits heute kann die CMOS-Technologie viele Vorteile für sich verbuchen:

- Hohe Geschwindigkeiten (Bildraten)

CMOS-Sensoren ermöglichen aufgrund ihrer Architektur eine deutlich höhere Bildrate. Kombiniert mit einer gesteigerten Empfindlichkeit und neuester Global Shutter-Technologie von CMOSIS, Sony und ON Semiconductor führt diese zu einer sehr schnellen Folge an aufzunehmenden Bildern. Dies resultiert in einer Performancesteigerung, so können z.B. mehr Teile pro Sekunde inspiziert werden.

- Flüssiges Durchmustern von Mikroskopie-Proben
- Schnelle Bilderfassung bei Applikationen im Bereich Lab Automation
- Hohe Auflösung (Anzahl der Pixel)

CMOS-Sensoren können aufgrund ihrer Architektur auch bei sehr hohen Auflösungen noch hohe Bildraten liefern, weshalb hochauflösende Sensoren vornehmlich mit dieser Technologie gefertigt werden.

- Genügend Auflösungsreserven für automatisiertes Proben-Scanning
- Hohe Auflösungen werden dem Megapixel-Trend in der Mikroskopie folgend benötigt
- Hohe Dynamik

Die Full-Well-Kapazität ist die maximale Anzahl an Elektronen pro Pixel. Das Verhältnis der Full-Well-Kapazität zur Empfindlichkeitsschwelle ist der Dynamikbereich, den der Sensor abdecken kann. Bezüglich der Dynamik gilt daher, dass der CMOS-Sensor das, was er auf der Seite der Empfindlichkeitsschwelle gegenüber dem CCD-Sensor verliert, bei der Sättigungskapazität wieder wettmacht. So liegen CMOS und CCD nahezu gleichauf, was die Dynamik angeht. Der Sony IMX174-Sensor ist ein gutes Beispiel für einen CMOS-Sensor, der im Dynamikumfang sogar allen vergleich- baren CCD-Sensoren überlegen ist.

- Hohe Abbildungsleistung bei Mikroskopie-Kameras
- Geringe Leistungsaufnahme
- Geringere Wärmeentwicklung und Strombedarf, ideal für kleinere oder mobile Medical-Devices
- Datenverbindung, wie z.B. USB 3.0, kann auch gleich die gesamte Kamera mit Strom versorgen; ermöglicht vereinfachten Systemaufbau und somit Reduktion von Kosten
- Verbesserte Rauscheigenschaften
- Die geringere Leistungsaufnahme von CMOS-Sensoren erzeugt weniger Wärmeentwicklung und verursacht dadurch geringeres Signalrauschen. Leitsatz: Eine Temperaturerhöhung um jeweils etwa 8 °C verdoppelt das Signalrauschen.
- Verbesserte Quanteneffizienz

Vor einigen Jahren konnte man sagen, dass CCD-Sensoren vor allem für Applikationen mit wenig Licht und CMOS-Sensoren bei viel Licht eher geeignet sind. Mittlerweile hat sich die Bildqualität der CMOS-Sensoren so deutlich verbessert, dass sie auch in Umgebungen mit wenig Licht eingesetzt werden können.

- Für Fluoreszenz-Anwendungen geeignet
- Gutes Preis-Leistungs-Verhältnis
- Senkt die Kosten von Medical Devices und Systeme

Dank dieser wichtigen Eigenschaften heutiger CMOS-Technologie wird sich diese Sensortechnologie zukünftig langfristig durchsetzen.

▶ *Basler AG*
sales.europe@baslerweb.com
www.baslerweb.com

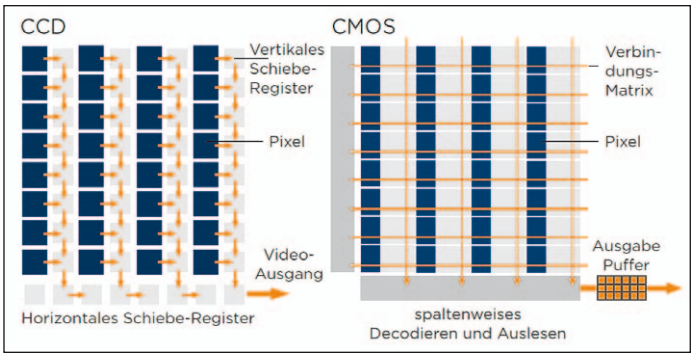


Bild 10: Aufbau eines CCD-Sensors (links) und eines CMOS-Sensors (rechts). Beim CCD-Sensor wird die Ladung pro Pixel weitergeschoben. Beim CMOS-Sensor hingegen wird jedes Pixel direkt ausgelesen, was den CMOS-Sensor deutlich schneller macht