

Wie Farb-Kameras funktionieren

Die Idee eines CCDs ist einfach. Wir können es uns als Speicher-Chip ohne "Deckel" vorstellen. Treffen Photonen auf die Speicherzellen, erzeugen sie dort Elektronen (fotoelektrischer Effekt). Dabei sind die Menge der Photonen und die Menge der Elektronen proportional zueinander. Die Wellenlänge der Photonen wird aber nicht an die Elektronen "weiter gegeben". CCD-Chips sind also farbenblind.

Im Folgenden beschreiben wir wie Farb-Kameras trotz der Farbenblindheit von CCD-Chips funktionieren.

Bitte beachten Sie:

- Die Verantwortung für die korrekte Integration von Kameras im Zusammenhang mit einer konkreten Applikation trägt ausschliesslich der System-Ingenieur vor Ort.

Inhalt

Grundlagen

Ausgangspunkt Monochrom-Kamera	2
3CCD Farb-Kamera	3
1CCD Farb-Kamera	4

1CCD Kameras zur Visualisierung und für die Messtechnik

Visualisierung	5
Messtechnik	6

Farb-Interpolation (zur Visualisierung)

Einführung	7
Kopie von Nachbar-Pixeln (nearest neighbor replication)	8
Mittelwerte von Nachbar-Pixeln (bilinear interpolation)	9

Farb-Auswertung (für die Messtechnik)

Einführung	10
Auswertung auf der Basis eines interpolierten Bildes	11
Auswertung auf der Basis des digitalen Original-Bildes	12



EUROPEAN HEADQUARTERS
The Imaging Source Europe GmbH
Sommerstrasse 36, D-28215 Bremen, Germany
support@eu.theimagingsource.com
Phone: +49 421 33591-0

US HEADQUARTERS
The Imaging Source, LLC
7257 Pineville-Matthews Road, Charlotte, NC 28226
support@us.theimagingsource.com
Phone: +1 704-370-0110 USA
Toll Free: +1 877-462-4772 USA

Sämtliche in diesem Dokument erwähnten Produkt- und Firmennamen können Warenzeichen oder Handelsbezeichnungen der jeweiligen Hersteller sein und werden hiermit anerkannt.

The Imaging Source Europe GmbH übernimmt keine Garantie oder Verpflichtung irgend einer Art für die in diesem Dokument enthaltene Information. Der in ihm verwendete Programm-Code dient ausschliesslich didaktischen Zwecken. The Imaging Source übernimmt keinerlei juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung, die sich aus der Verwendung des Dokument-Inhalts oder des Programm-Codes ergeben sollten. The Imaging Source behält sich das Recht vor, jederzeit und ohne Ankündigung technische Daten, Funktion oder Gestaltung zu ändern.

Stand: Juli 2005
Copyright © 2005 The Imaging Source Europe GmbH
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der The Imaging Source Europe GmbH.

Abmessungen und Gewichte sind Näherungswerte.

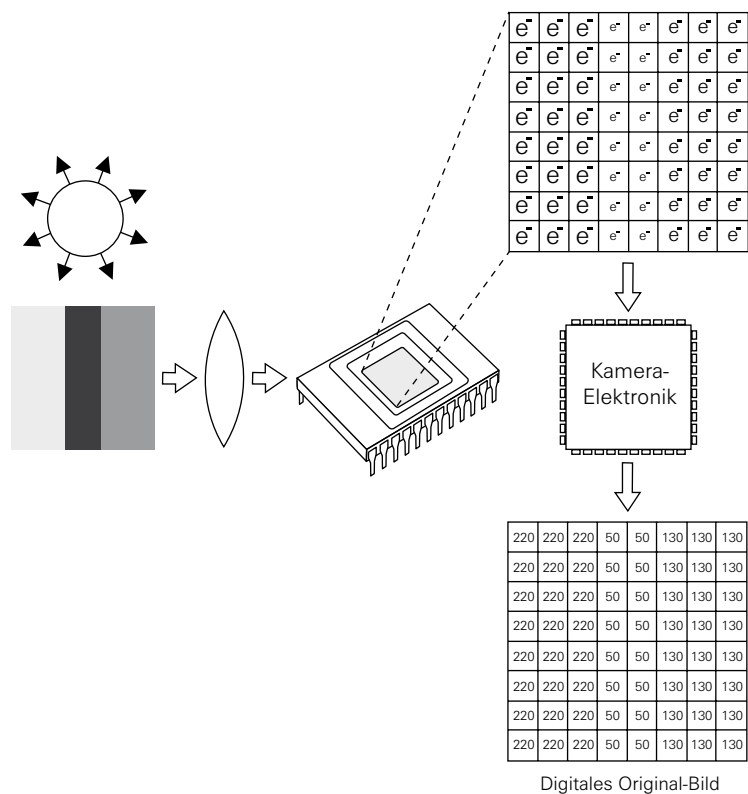
Grundlagen

Ausgangspunkt Monochrom-Kamera

Die Idee eines CCDs ist einfach. Wir können es uns als Speicher-Chip ohne "Deckel" vorstellen. Damit sind also die Speicherzellen durch Lichtstrahlen erreichbar. Aufgrund des Photoeffekts erzeugen diese Lichtstrahlen negative Ladungen in den Speicherzellen (rechts oben im Bild).

Nach der Belichtungszeit werden diese Ladungen ausgelesen und durch die Kamera-Elektronik aufbereitet. Am Ausgang dieser Kamera-Elektronik steht dann ein digitales Bild zur Verfügung.

Benötigt die Kamera einen analogen Video-Ausgang, müsste das digitale Original-Bild entsprechend gewandelt werden. Im Zusammenhang mit dem hier diskutierten Thema "Wie funktionieren Farbkameras" ist diese Frage aber nicht relevant. Wir benötigen nur das digitale Original-Bild für unsere Betrachtung.



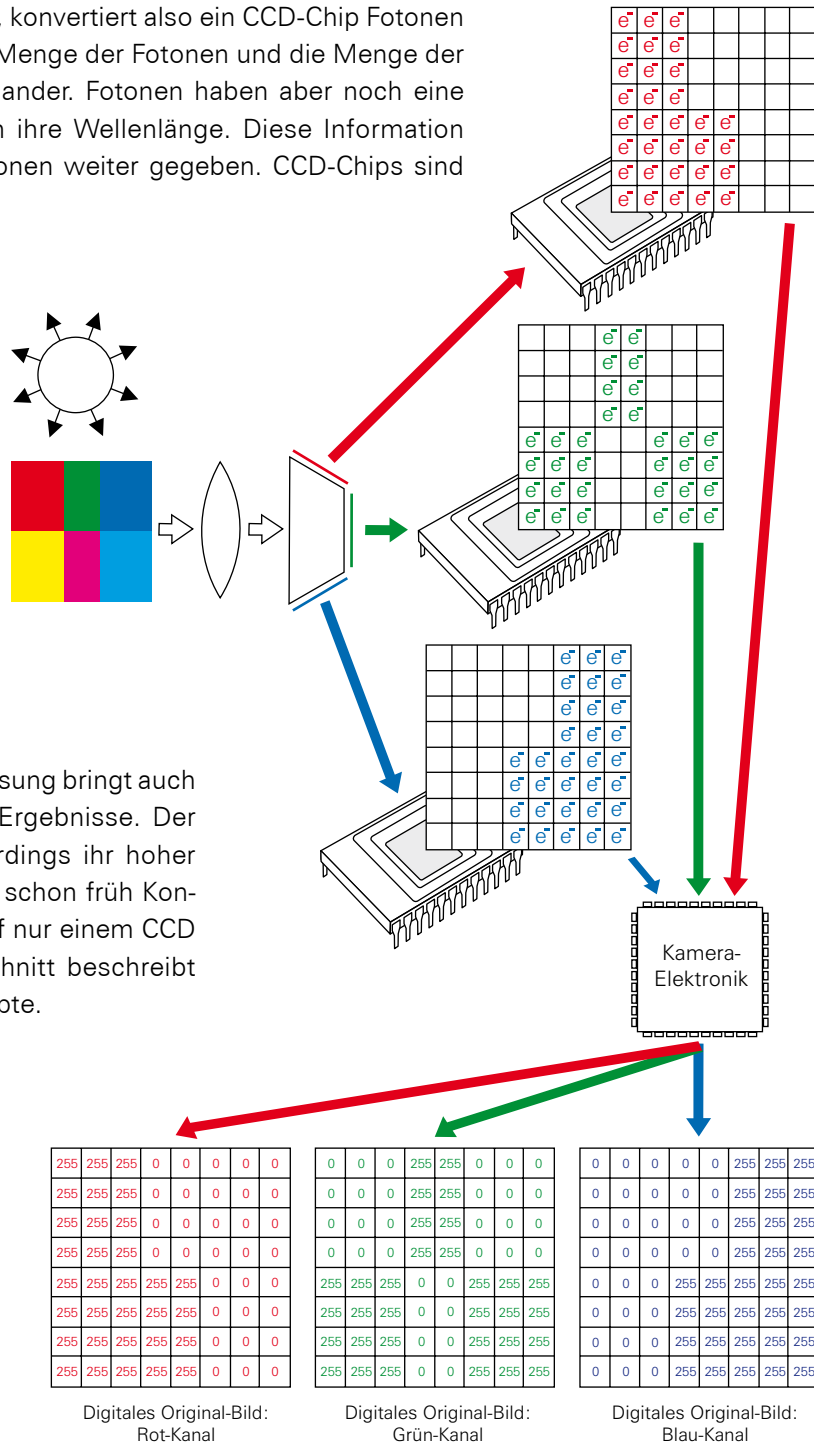
Grundlagen

3CCD Farb-Kamera

Etwas holzschnittartig gesagt, konvertiert also ein CCD-Chip Fotonen in Elektronen. Dabei sind die Menge der Fotonen und die Menge der Elektronen proportional zueinander. Fotonen haben aber noch eine weitere Eigenschaft, nämlich ihre Wellenlänge. Diese Information wird aber nicht an die Elektronen weiter gegeben. CCD-Chips sind also farbenblind.

Wenn wir am Ausgang der Kamera-Elektronik für jedes Pixel einen Rot- UND, Grün- UND Blauwert benötigen, müssen wir also für jede dieser Grundfarben ein CCD einsetzen. Jedes dieser CCDs bekommt nur "gefilterte Fotonen": ein CCD sieht Rot, ein zweites Grün und das dritte Blau. Diese drei "Fotonen-Kanäle" werden von einem Prisma erzeugt.

Diese sofort einleuchtende Lösung bringt auch in der Praxis hervorragende Ergebnisse. Der wesentliche Nachteil ist allerdings ihr hoher Preis. Daher entwickelte man schon früh Konzepte für Farbkameras, die auf nur einem CCD basieren. Der folgende Abschnitt beschreibt das verbreitetste dieser Konzepte.

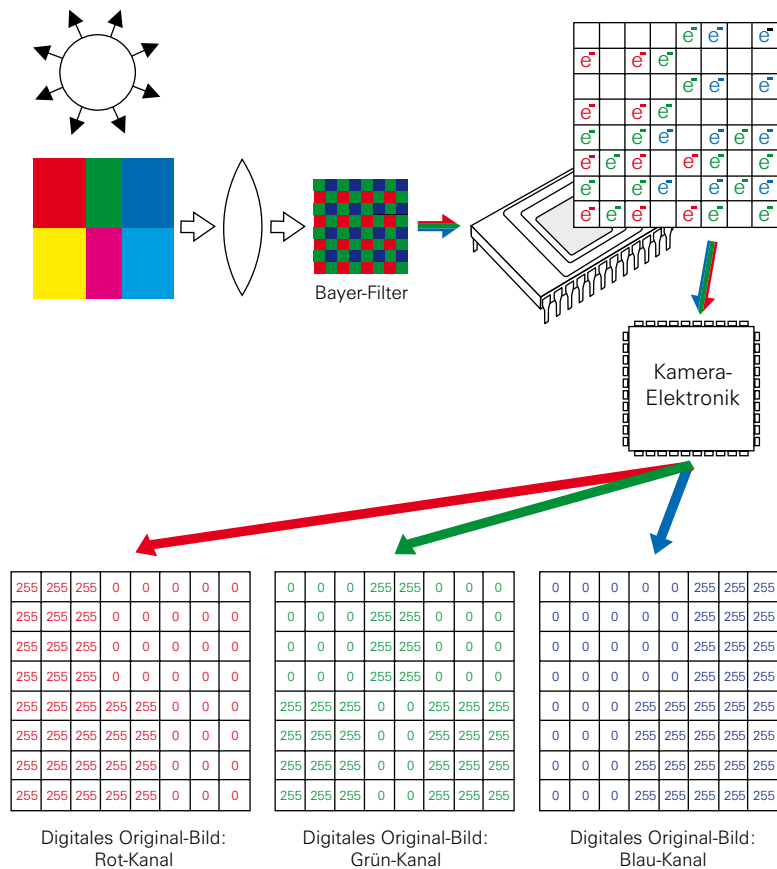


Grundlagen

1CCD Farb-Kamera

Dürfen wir aus Kostengründen nur ein CCD-Chip benutzen, müssen wir die Farbfilter mosaikähnlich über alle Pixel dieses einen CCDs verteilen. Man spricht daher auch von Mosaik- oder Bayer-Filter. Herr Bayer war der Erfinder dieses Filters.

Damit liefert ein Pixel also ENTWEDER einen Rot- ODER einen Grün- ODER einen Blau-Wert. Am Ausgang der Kamera-Elektronik soll ein und derselbe Pixel aber einen Rot- UND einen Grün- UND einen Blau-Wert liefern. Wie also bekommen wir die fehlenden Werte?



Die Lösung heisst "Räumliche Farb-Interpolation" durchgeführt durch die Kamera-Elektronik. Nehmen wir als Beispiel den Rot-Pixel links unten in der Ecke. Uns fehlt also ein Grün- und ein Blau-Wert. Der Interpolations-Algorithmus schätzt diese beiden fehlenden Werte durch ein Analyse der Nachbarn unseres Rot-Pixels. In unserem Beispiel findet er Grün-Pixel, die viel Ladung enthalten aber völlig ungeladene Blau-Pixel. Damit ist also unser Rot-Pixel tatsächlich gelb. Im Abschnitt Farb-Interpolation finden Sie detaillierte Informationen dazu.

Vergleicht man die 3 digitalen Original-Bilder der 3CCD Kamera und der 1CCD Kamera, so erscheinen sie identisch. Dieses gilt aber tatsächlich nur für unsere stark vereinfachten Beispiele. In der Praxis verursachen auch die besten Farb-Interpolations-Verfahren einen Tiefpass-Effekt. 1CCD Kameras liefern daher deutlich unschärfere Bilder, als 3CCD oder Monochrom-Kameras. Besonders störend wirkt das auf feine, fadenähnliche Bildstrukturen.

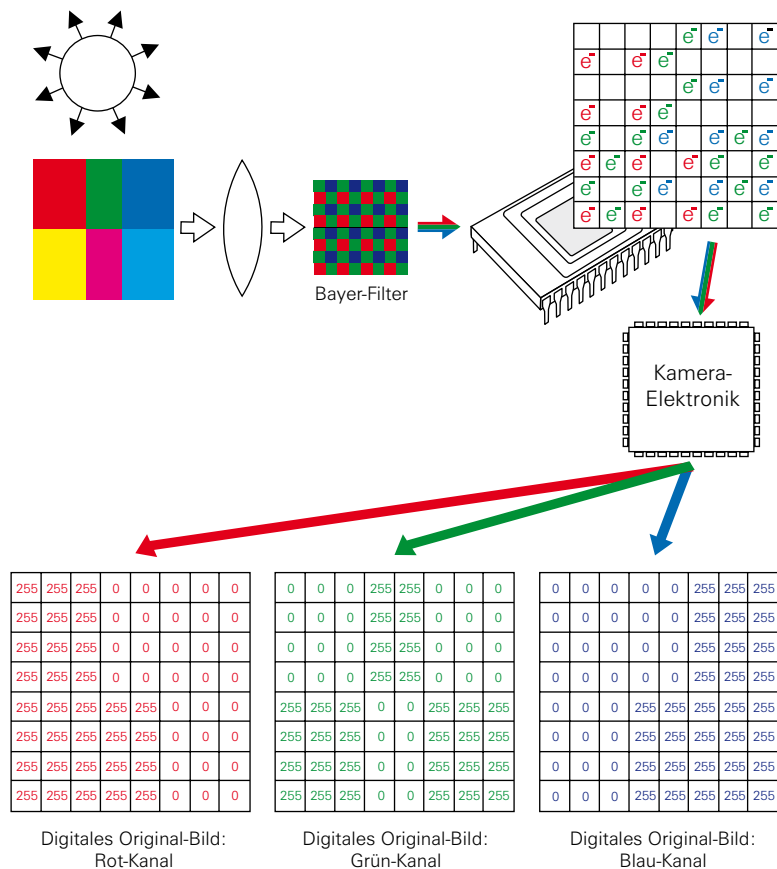
1CCD Kameras zur Visualisierung und für die Messtechnik

Visualisierung

Die Funktionsweise von 1CCD Farb-Kamera zur Visualisierung haben wir bereits im Abschnitt [Grundlagen](#) gesehen. Ein Mosaik-Filter (auch Bayer-Filter genannt) sorgt dafür, dass ein Pixel ENTWEDER Rot ODER Grün ODER Blau sieht. Das Bild rechts zeigt diese Idee. Sie können das Bild durch einen Mausclick vergrößern.

Da wir aber am Ausgang der Kamera für jedes Pixel einen Rot- UND Grün- UND Blau-Wert erwarten, interpoliert die Kamera-Elektronik fehlende Farbwerte. Im Abschnitt Farb-Interpolation finden Sie Details dazu.

Der entscheidende Vorteil dieser Vorgehensweise ist ihr niedriger Preis. Die Qualität heute verfügbarer 1CCD Kameras ist dabei erstaunlich hoch. Die weit überwiegende Zahl von Farbkameras beruht daher auf dieser Technik.



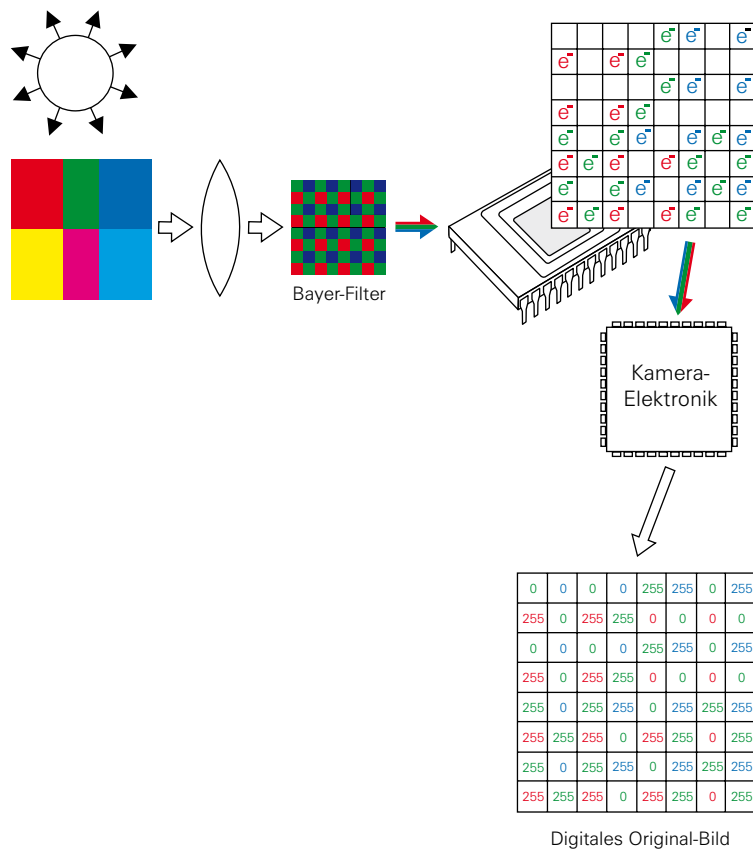
1CCD Kameras zur Visualisierung und für die Messtechnik

Messtechnik

Für Anwendungen in der messtechnischen Bildverarbeitung hat die Farb-Interpolation entscheidende Nachteile:

- Wir haben zwar für jedes Pixel einen Rot-, Grün- und Blau-Wert aber nur einer dieser Werte entstammt wirklich dem CCD. Die beiden anderen Werte sind interpoliert, also mehr oder weniger GESCHÄTZT.
- Die geschätzten Werte sind nicht nur störend für die Messtechnik an sich, sie belasten zu allem Überfluss den Bus und den Prozessor des auswertenden Rechners unnötigerweise.

Für messtechnische Zwecke ist es daher vorteilhaft die Farb-Interpolation abzuschalten und die vom CCD aufgesammelten Ladungen direkt in das digitale Original-Bild zu wandeln.



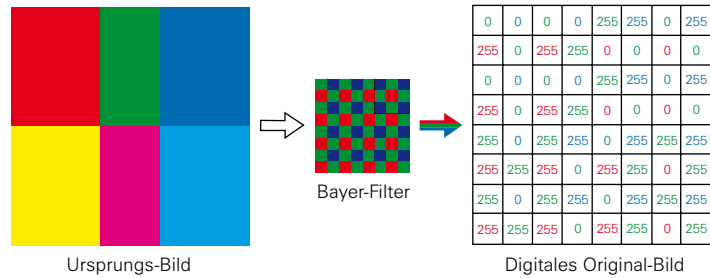
Wichtig: Heute geht der Grossteil der Software zur Auswertung von Farbbildern davon aus, dass für jeden Pixel ein Rot-, Grün und Blau-Wert vorliegt. Der Umgang mit dem digitalen Original-Bild ist aber für viele ungewohnt. Daher beschreiben wir im Abschnitt [Farb-Auswertung](#) die grundlegende Idee der Auswertung des digitalen Original-Bilds.

Farb-Interpolation (zur Visualisierung)

Einführung

Im Abschnitt [Grundlagen](#) haben wir die Idee der Farb-Interpolation anhand eines Beispiels beschrieben. Um dieses Beispiel übersichtlich zu halten, wurden die drei Ergebnis-Bilder (die drei Farbkanäle des digitalen Original-Bilds) dort idealisiert dargestellt.

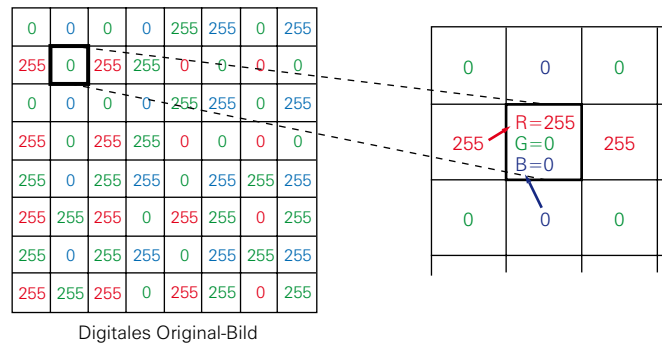
Im Folgenden zeigen wir zwei einfache Interpolations-Verfahren im Detail. Dabei gehen wir von dem im Abschnitt [1CCD Kameras zur Visualisierung und für die Messtechnik](#) beschriebenen digitalen Original-Bild für den Fall "Messtechnik" aus. Zur besseren Übersicht sehen Sie rechts dieses digitale Original-Bild, dessen Ursprungsbild sowie das Bayer-Filter.



Farb-Interpolation (zur Visualisierung)

Kopie von Nachbar-Pixeln (nearest neighbor replication)

Die einfachste Möglichkeit die fehlenden Farbwerte "aufzufüllen" ist das Übernehmen benachbarter Werte. Nehmen wir als Beispiel den ersten Grün-Pixel (des Bayer-Filters) in der zweiten Zeile. Dieses Pixel ist im Bild rechts fett umrandet.

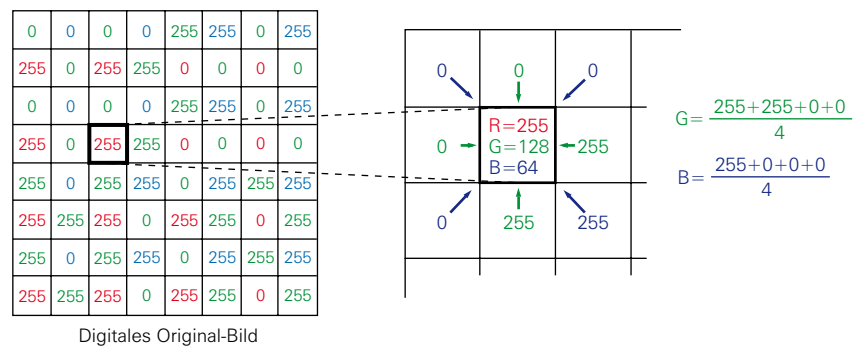
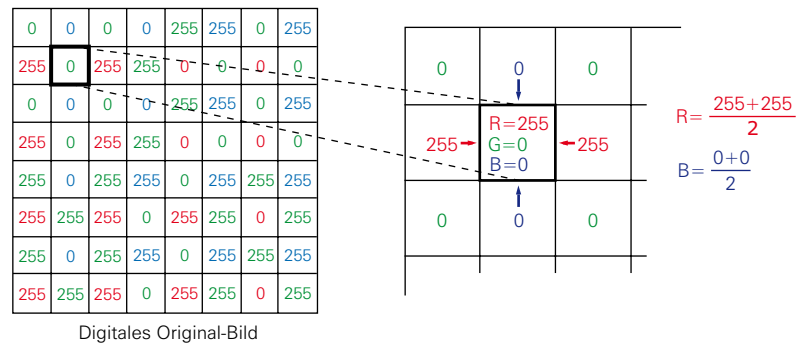


Da das Ursprungs-Bild an dieser Stelle rot ist (siehe Einführung), ergibt die Abtastung mit dem Grün-Pixel des Bayer-Filters 0. Die fehlenden Rot- und Blau-Werte holen wir uns einfach (wie rechts gezeigt) von den direkt benachbarten Rot- und Blau-Pixeln. Wir kommen so zu einem RGB-Wert von (255,0,0).

Für das Beispiel rechts ergibt die Interpolation also tatsächlich den korrekten RGB-Wert. In der Praxis allerdings führt diese primitive Art der Interpolation zu groben Fehlern, die für statische Bilder kaum akzeptabel sind. Da das Verfahren aber nicht besonders rechenintensiv ist, eignet es sich durchaus für Videostreams an deren Qualität keine hohen Ansprüche gestellt werden (z.B. ein Vorschau).

Farb-Interpolation (zur Visualisierung)

Mittelwerte von Nachbar-Pixeln (bilinear interpolation)



Eine erste Verbesserung der einfachen Kopier-Interpolation ist die Verwendung der Mittelwerte mehrerer Nachbar-Pixel (bilinear interpolation). Wie das Bild zeigt, ergibt sich auch hier der korrekte RGB-Wert von (255,0,0).

Im unteren Beispiel allerdings sehen wir den entscheidenden Nachteil des Mittelwert-Verfahrens. Es ist mit einem Tiefpass-Verhalten verbunden und verschleift daher scharfe Kanten. Eigentlich müsste an dieser Stelle der RGB-Wert ebenfalls (255,0,0) sein. Tatsächlich aber ist er (255,128,64), also ein bräunliches Orange.

Die Qualität der in modernen Kameras eingesetzten Interpolations-Verfahren ist sehr viel höher, als die der oben gezeigten Basis-Verfahren. Einen hervorragenden Überblick und Vergleich bietet die Studie: [A Study of Spatial Color Interpolation Algorithms for Single-Detector Digital Cameras](#).

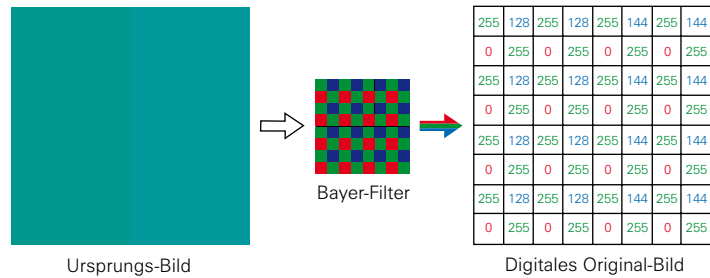
Normalerweise haben Sie keinen Einfluss auf das Interpolations-Verfahren einer "üblichen" Farbkamera. Mit der DBK 21F04, der DBK 21AF04, der DBK 21BF04, der DBK 31AF03, der DBK 31BF03, der DBK 41AF02 und der DBK 41BF02 bietet The Imaging Source Farb-Kameras ohne Interpolation. Sie sind besonders für die Farb-Auswertung geeignet.

Farb-Auswertung (für die Messtechnik)

Einführung

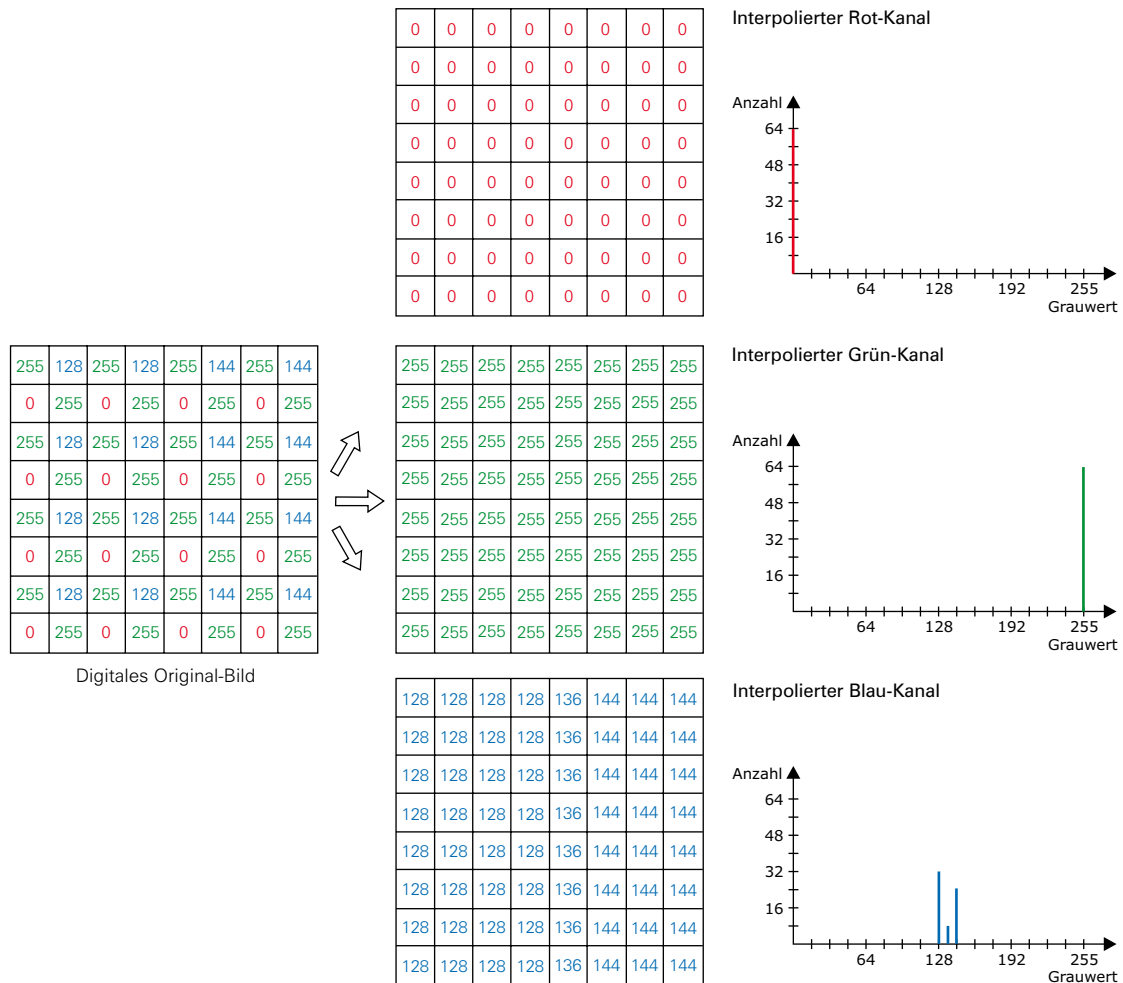
Im Abschnitt [1CCD Kameras zur Visualisierung und für die Messtechnik](#) haben wir festgestellt, dass interpolierte Bilder sich nur bedingt für messtechnische Zwecke eignen. Im Folgenden demonstrieren wir anhand des Beispiels rechts die Ursache dafür.

Das Ursprungs-Bild besteht aus zwei homogenen Flächen, deren Farbwerte sich nur leicht unterscheiden. Die Pixel der linken Hälfte weisen einen RGB-Wert von (0,255,128) auf, die RGB-Werte der Pixel zur Rechten sind (0,255,144).



Farb-Auswertung (für die Messtechnik)

Auswertung auf der Basis eines interpolierten Bildes



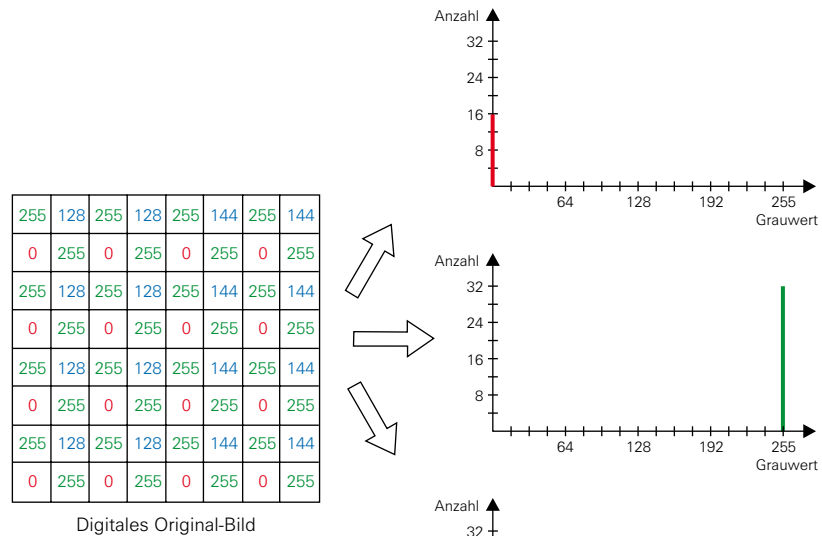
Das Bild zeigt das Ergebnis der Farb-Interpolation unseres Ursprungs-Bildes. Der Einfachheit halber kam hier die in Abschnitt [Farb-Interpolation](#) beschriebene Interpolation durch Mittelwert-Bildung (bilinear interpolation) zur Anwendung. Als Ergebnis dieser Interpolation erhalten wir je ein Bild für den Rot-Kanal, den Grün-Kanal und den Blau-Kanal.

Ein typisches Verfahren zur Trennung von Bildregionen basiert auf der Histogramm-Analyse. Wie die Diagramme rechts im Bild zeigen, befinden sich im Rot-Kanal ausschliesslich 64 Werte "0". Der Grün-Kanal hingegen bietet 64 Werte "255". Diese beiden Kanäle sind für eine Trennung der beiden Bereiche also wertlos.

Nur im Blau-Kanal ist die "Lücke" im Histogramm zwischen 32 Werten "128" und 24 Werten "144" offensichtlich. Die ausserdem vorhandenen 8 Werte "136" ergeben sich aus dem Tiefpass-Effekt der Farb-Interpolation. Dieser Effekt führt zum "Verschmieren" der eigentlich scharfen Kante zwischen den beiden Bildregionen.

Farb-Auswertung (für die Messtechnik)

Auswertung auf der Basis des digitalen Original-Bildes



Wendet man nun diese Histogramm-Analyse einfach direkt auf das digitale Original-Bild an, ergeben sich zwei Vorteile:

- Wir belasten uns nicht mit Daten, die zu 2/3 redundant sind.
- Da keine Interpolation zur Anwendung kommt, kann es auch keine Störungen wie z.B. verschliffene Kanten geben.

Die drei Histogramme zeigen wiederum, dass der Rot- und der Grün-Kanal für unsere Auswertung unbrauchbar sind. Das Histogramm des Blau-Kanals gibt aber exakt die Verhältnisse im Ursprungsbild wieder.

Man mag einwenden, dass in der heutigen Praxis niemand mehr die Interpolation durch eine Mittelwert-Bildung (bilinear interpolation), sondern durch wesentlich leistungsfähigere Verfahren realisiert. Allerdings bezieht sich diese Leistungsfähigkeit auf eine möglichst gute Visualisierung, nutzt also als Referenz letztlich das menschliche visuelle System. Aus messtechnischer Sicht erzeugen aber auch diese "leistungsfähigeren" Interpolationen Bildstörungen verschiedenster Art, die eine Bild-Auswertung unmöglich machen können.