

Das Auflösungsvermögen der elektronischen Bildträger

Informationstheorie – Die grundlegende Beschränkung

Genau wie beim Silberfilm spielen auch bei den digitalen Bildsensoren Größe und Abstand der lichtempfindlichen Elemente die grundlegende Rolle für das räumliche Auflösungsvermögen. Die Strukturgröße, die ein Sensor mit gegebener Pixelgröße und -anzahl auflösen kann, wird durch das **Nyquist-Shannon-Abtasttheorem** bestimmt. Es besagt, daß ein kontinuierliches bandbegrenztetes Signal (eines mit einer Minimalfrequenz f_{Min} von 0 Hertz und einer Maximalfrequenz f_{Max} von x -Hertz) mit einer Frequenz $\geq 2 \cdot f_{\text{Max}}$ abgetastet werden muss, damit man aus dem so erhaltenen zeitdiskre-

ten Signal das Ursprungssignal ohne Informationsverlust (aber mit unendlich großem Aufwand) rekonstruieren bzw. (mit endlichem Aufwand) beliebig genau annähern kann:

Formel 29

$$\text{Abtastfrequenz} \geq 2 * \text{Maximalfrequenz}$$

Das ist zwar reichlich verquast, sagt im Grunde aber nur, daß zwei Pixel nötig sind, um zwei Strukturen als getrennt aufzulösen. Auf unsere Betrachtung übertragen bedeutet das Theorem, daß die theoretisch maxi-

Harry Nyquist (1889-1976) war ein in Schweden geborener und in die USA ausgewanderter Physiker, der die zur Informationsübertragung erforderliche Bandbreite erforschte.

Claude Elwood Shannon (1916-2001), amerikanischer Mathematiker und Elektrotechniker, hat die Informationstheorie begründet.

mal nutzbare Auflösung in Pixeln oder Linien pro Längeneinheit (Maximalfrequenz) der halben Pixelanzahl in jeder der beiden Dimensionen des Sensors entspricht. Im Fall einer Canon EOS-1Ds Mark II mit einer hori-

Abbildungsschärfe II:

Das photographische Auflösungsvermögen

zontalen Pixelanzahl von 4992 und einem Pixelabstand von $7,2 \mu\text{m}$ sagt uns die Formel, daß diese Kamera

$$\text{Maximalfrequenz} = \frac{\text{Abtastfrequenz}}{2}$$

$$\text{Maximalfrequenz} = \frac{4992}{2}$$

$$\text{Maximalfrequenz} = 2496 \text{ Linienpaare}$$

2496 Linienpaare in dieser Achse und Strukturen bis zu einem Abstand von $14,4 \mu\text{m}$ zueinander auflösen kann ($7,2 \mu\text{m} * 2 = 14,4 \mu\text{m}$). Teilen wir die 2496 Linienpaare durch die Breite des Sensors (36 mm), so erhalten wir die Anzahl Linienpaare pro Millimeter. Diese Frequenz wird auch als **Nyquist-Frequenz** bezeichnet und markiert die höchste Ortsfrequenz, bis zu der der Sensor echte Informationen erfassen kann.

$$2496 \text{ Linienpaare} / 36 \text{ mm} = 69,3 \text{ Lp/mm}$$

Weist das Motiv Strukturen auf, die nah an der Nyquist-Frequenz oder sogar darüber liegen, so wird das Bild aufgrund der für sie zu geringen Abtastfrequenz Artefakte aufweisen, die die reale Szene nicht enthielt. Diese künstlichen Signale werden als **Aliasing** bezeichnet und treten in sich periodisch wiederholenden Mustern als Farbsäume (**Moirés**) und in nichtrepetitiven Mustern als gezackte diagonale

Linien (**Jaggies**) hervor. Im Fernsehen kann man den Effekt zuweilen beobachten, wenn der Moderator ein Jackett in sehr feinem Fischgrätmuster trägt. Um sie zu vermeiden, sollte die Kombination aus Sensor und Optik oberhalb der Nyquist-Frequenz idealerweise keine Reaktion ($\text{MTF} = 0$) zeigen. Praktisch ist dies leider nicht erreichbar und so müssen die Sensoren mit einem **Anti-Aliasing-Filter** (auch Tiefpassfilter) bestückt werden, um die Bilder frei von den ungewollten Artefakten zu halten. Dies ist eine aufgedampfte Schicht, die Licht mit Wellenlängen unterhalb des Pixelabstands absorbiert. Sie wird so dünn wie möglich gehalten, um zusätzlichen störenden Effekten vorzubeugen, führt aber zu einem weicheren Bild, das durch nachträgliche Schärfung wieder aufgebessert werden muss. Nur bei besonders kompakten Digitalkameras (Point-and-Shot) mit Pixelabständen von weniger als $4 \mu\text{m}$ genügt die dämpfende Modulations-Transferfunktion des Objektivs, um das Aliasing zu verhindern.

Um die ganze Theorie abschließend zurechtzurücken, muss man sich darüber klar sein, daß das Ursprungssignal niemals klar begrenzt ist und es keine einheitliche Bedeutung der analogen Rekonstruktion gibt – Drucker, Belichter und Monitore unterscheiden

Auszug aus PhotoWissen Band 4 Visuelle Schärfe

Infos zum Buch auf www.buecherundbilder.de/photowissen



Abb. 44: Aliasing schematisch

Das Schema zeigt die Pixel als abwechselnd weiße und graue Kästchen in der mittleren Zeile. Definitionsgemäß entspricht die Nyquist-Frequenz 1 Zyklus auf 2 Pixel. Das Signal in der oberen Zeile (3 Zyklen auf 4 Pixel) entspricht $3/2$ der Nyquist-Frequenz, aber die Ausgabe des Sensors (untere Zeile) entspricht der halben Nyquist-Frequenz. Dies ist falsch und deshalb kommt es zum Aliasing.

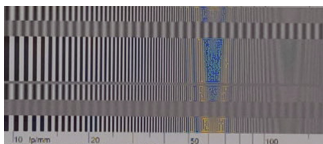


Abb. 45: Aliasing Beispiel

Foto eines Balkentestdiagramms mit einer Kodak DCS 14n, die kein Anti-Aliasingfilter besitzt. Die Auflösung ist bis zur Nyquist-Frequenz (63 Lp/mm) sehr hoch. Weswegen das Aliasing in diesem Bereich sehr ausgeprägt ist. Zum Teil liegt das am Pixelmuster des Bayerensors. Seine horizontale und vertikale Nyquist-Frequenz ist aufgrund der unterschiedlichen Pixelanzahlen für die rot- und blauempfindlichen Pixel nur halb so groß wie für die grünempfindlichen. Der Foveosensor ist im Gegensatz dazu an jedem Pixel für alle drei Farben empfindlich. Auch er besitzt kein Anti-Aliasingfilter und aus diesem Grund eine hohe Auflösung bis zur Nyquist-Frequenz, aber die von ihm generierten Moirees sind monochrom und deshalb weit weniger augenfällig.

sich schließlich deutlich voneinander. Aus diesen Gründen kann das Originalsignal nie wirklich präzise rekonstruiert werden und Kompromisse zwischen der echten Auflösung und dem Aliasing sind unvermeidlich.

Wenn Sie bis hierher gut mitgedacht haben, könnten Sie nun einwenden, daß das **Abtast-Theorem** eigentlich auch auf den **Silberfilm** anzuwenden sei, ich das im diesbezüglichen Abschnitt aber versäumt habe. Auf den ersten Blick ist das gar nicht so abwegig, aber es gibt ein paar gute Gründe, die dagegen sprechen. Auf einem herkömmlichen Bildsensor weisen die Pixel alle dieselbe Größe auf und sind absolut regelmäßig und ohne Überlappung angeordnet. Nicht so beim Silberfilm. Dort sind die Silberpartikel nicht regelmäßig in der photographischen Schicht verteilt, sondern mehr oder weniger zufällig in ihr angeordnet und weisen auch nicht alle dieselbe Größe auf. Darüber hin-

Abbildungsschärfe II:

Das photographische Auflösungsvermögen

aus ist die Schicht auch mehr als einen Silberhalogenid-Kristall stark, was die Zufälligkeit der Anordnung noch erhöht. Ohne geometrische Regelmäßigkeit gibt es aber keine mathematische Berechenbarkeit und deshalb greift Nyquist hier nicht. Das analoge Material arbeitet also ganz anders als die elektronischen Bildsensoren und wir können die „Filmpixel“ nicht direkt mit den digitalen Pixeln vergleichen. Der einzig zweckmäßige Weg beide gegenüber zu stellen ist es, die fertigen Endergebnisse zu betrachten.

Der Kell-Faktor und das theoretisch maximale Auflösungsvermögen

So weit die Theorie. Um die mit ihr errechnete Anzahl der Linienpaare praktisch zu erreichen, ist es natürlich nötig, daß die Linien immer genau auf separate Pixel fallen und deshalb ist das Wort „theoretisch“ in diesem Zusammenhang besonders wichtig. Denn realistisch betrachtet ist es außerordentlich verwegen anzunehmen, daß uns die Strukturen unserer Motive den Gefallen tun, sich so regelmäßig anzuordnen. In freier Wildbahn müssen wir eher damit rechnen, daß feine Details auch mal zwischen zwei Pixel rutschen und wenn das passiert, ist unser eben berechnetes theoretisches Maß im Eimer. Natürlich hat dieses

praxisnahe Verhalten auch einen Namen. Es wird nach seinem Entdecker, dem bei RCA tätigen TV-Ingenieur Raymond D. Kell, als **Kell-Faktor** bezeichnet und liegt in einer Größenordnung von rund 70% bis 80%. Der Kell-Faktor besagt, daß ein System mit einer Abtaste von x in einer gegebenen Richtung (horizontal oder vertikal) $0,7 \cdot x$ Linien auflösen kann. Achtung, aufpassen, Verwechslungsgefahr: Das Nyquist-Theorem bezieht sich immer auf Linienpaare, der Kell-Faktor auf Linien. Wenn Sie beide vergleichen wollen, müssen Sie entweder Nyquist mit zwei multiplizieren oder Kell durch zwei dividieren.

Daß der Kell-Faktor wirklich realistisch ist, können wir an einem praktischen Beispiel überprüfen. Die Leute von dpreview.com geben in ihrem Test der Canon EOS-1Ds Mark II (effektive Pixel 4992×3328) ein gemessenes Auflösungsvermögen von 2800 Linien horizontal und 2400 Linien vertikal an. Diese 2400 Linien in der Vertikalen entsprechen 72% der 3328 Pixel in dieser Ebene. Wenn Sie nun einwenden, daß die 2800 Linien in der Horizontalen aber nur einem Wert von 56% der Pixel dort entsprechen, beachten Sie bitte, daß die Herrschaften ihren Auflösungstest in Bezug auf die Anzahl der Linien pro Bildhöhe kalibriert haben. So sind die Zahlen vergleichbar,

ohne Rücksicht auf das Seitenverhältnis nehmen zu müssen. Wenn Sie also den Wert für die Linien pro Bildbreite haben wollen, müssen Sie die angegebene Zahl mit dem Seitenverhältnis $3:2 = 1,5$ multiplizieren: $2800 \cdot 1,5 = 4200$. Dieser Wert liegt mit 84% in dem von Kell vorausgesagten Spektrum. Wir können noch einen Schritt weiter gehen. Wenn Sie die mit dem Kell-Faktor errechneten Werte durch zwei teilen, um aus den Linien Linienpaare zu machen, entsprechen die Ergebnisse für die Horizontale und die Vertikale grob $\frac{2}{3}$ der von Nyquist vorausgesagten Maximalwerte. Die Angabe $\frac{2}{3}$ können Sie sich merken, denn sofern der Sensor einen Anti-Aliasung-Filter besitzt, sperrt dieser ab ungefähr diesem Wert.

Das Auflösungsverhalten bei farbigen Strukturen

Bis hierher bezieht sich alles auf Gittermuster aus schwarzen und weißen Strukturen, gilt also für das räumliche Auflösungsvermögen von Strukturen, die sich im Hinblick auf ihre Helligkeit unterscheiden. Da wir eingangs gesehen haben, daß unser visuelles System aufgrund der Struktur seiner Informationsverarbeitung (Wo-Bahn, Was-Bahn) bei farbigen Vorlagen ein anderes Auflösungsverhalten zeigt, als bei schwarzweißen, sollten wir die

elektronischen Bildträger ebenfalls in dieser Hinsicht betrachten.

Bayer-Muster Sensoren generieren Farbe durch den **Demosaicing-Prozess**. So wird der Vorgang genannt, in dem das primärfarbige Filtermuster (Color Filter Array, CFA) in ein fertiges Bild mit voller Farbinformation in jedem Pixel übersetzt wird. Da jede Sensorstelle nur Informationen über einen Bereich des Spektrums liefert (kurzwellig/Blau, mittelwellig/Grün, langwellig/Rot), muss der Demosaicing-Algorithmus die beiden jeweils fehlenden Daten interpolieren, quasi „raten“. Dabei stützt er sich

Bayer-Muster Sensoren besitzen doppelt so viele grüne Pixel, wie rote und blaue, weil unser visuelles System für den mittelwelligen Bereich des Spektrums am empfindlichsten ist.

auf die benachbarten Pixelwerte und stellt etwas an, das man im Englischen als *educated guess* bezeichnet. Die einzelnen Pixel werden zu 2×2 Elementen messenden Feldern gruppiert und im Hinblick auf ihre räumlichen und/oder chromatischen Beziehungen miteinander verrechnet. Die dahinterstehende Mathematik ist von Hersteller zu Hersteller verschieden und

Abbildungsschärfe II:

Das photographische Auflösungsvermögen

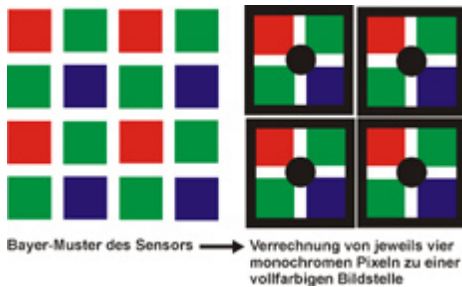
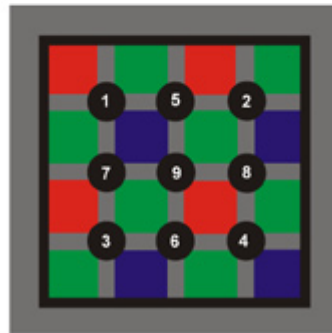
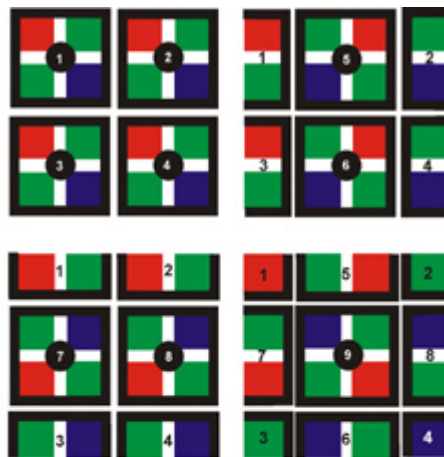


Abb. 46: Demosaicing einfach

ein streng gehütetes Geheimnis, denn sie entscheidet maßgeblich über die Bildqualität. Zudem werden ständig neue Algorithmen publiziert. Die z.Zt. Hochwertigsten beziehen auch das gespeicherte Wissen über eine Vielzahl natürlicher Szenen in ihre Berechnungen ein, sind im Hinblick auf den Bildinhalt also adaptiv.

Was das Auflösungsvermögen für farbige Strukturen angeht, so ist zu bemerken, dass es in horizontaler und vertikaler Richtung auf die Hälfte des Helligkeitswertes sinkt, wenn die Kamera diese 2x2 Elemente großen Felder stur nebeneinandersetzt und zu jeweils einem neuen Pixelwert summiert (Abb. 46). Diese wäre der schlechteste Fall. Um einen höheren Wert zu erzielen, werden deshalb einander überlappende Bereiche genutzt (Abb. 47). Auf diese Weise landet das Auflösungsvermögen irgendwo zwischen dem vollen und dem halben

Wert. Aber das ist alles nicht schlimm, denn *unser* Auflösungsvermögen ist in dieser Hinsicht ja sechs mal schlechter.



Aus mehreren 2x2 Pixel großen Feldern (oben) werden einzelne vollfarbige Pixel berechnet (unten), um eine höhere Auflösungsleistung zu erzielen.

Abb. 47: Demosaicing aufwendig

Kameras mit *Foveon-Sensor* (in der Hauptsache die des Herstellers *Sigma*, zu dem *Foveon Inc.* gehört) kennen kein solches Gefälle. Diese Bildträger integrieren drei übereinanderliegende Schichten für Rot (langwellig, oben), Grün (mittelwellig, mitte) und Blau (kurzwellig, unten). Dank dieser aufwendigeren Architektur, die den Umstand ausnutzt, daß Licht der verschiedenen Wellenlängenbereiche unterschiedlich tief in das Silizium eindringt, liefern sie an jedem Pixel die volle Farbinformation, also Auflösung. Was auf den ersten Blick wie ein Vorteil aussieht, ist aber keiner, denn Farbauflösung in gleicher Größenordnung wie Helligkeitsauflösung ist dank unseren physiologischen Voraussetzungen verschwendet – wir können sie schlicht nicht wahrnehmen. Nur, wenn man spezielle Testtafeln mit Farbkombinationen verwendet, die dieselbe Helligkeit besitzen (also isoluminant sind), ist die Foveon-Technologie dem Bayer-Muster gegenüber im Vorteil. Aber in diesen Fällen hätten wir die gleichen Schwierigkeiten, die Testmuster zu erkennen und außerhalb von Labors begegnen uns Motive ohne Helligkeitsänderungen nur extrem selten.

Nun hört und liest man immer mal wieder die Vermutung, daß das Helligkeits-Auflösungsvermögen von Bayer-Muster Sensoren aufgrund der

für das Demosaicing nötigen Blockbildung aus 2x2 Pixeln oder weil angeblich ausschließlich die „grünen Pixel“ für das Helligkeitssignal genutzt werden nur halb so groß sein soll, wie das der jeweils monochromen Foveon-Schichten. Aber das ist falsch, denn da die spektrale Charakteristik der Blau-, Grün- und Rotfilter bekannt ist, kann und wird der Helligkeitswert (Y) als gewichtetes Mittel für jedes einzelne Pixel nach der ISO-Vorgabe $Y=0.2125*Rot+0.7154*Grün+0.0721*Blau$ bestimmt.

Was aber, und das ist ein weiterer häufiger Einwand, wenn das Motiv beispielsweise rein grün ist. In diesem Fall müssten die Werte der blauen und roten Pixel null und damit zur Berechnung der Helligkeit nutzlos sein. Aber auch diese Annahme ist falsch, denn sie geht davon aus, daß Helligkeit und Farbe in jedem Pixel komplett unabhängig voneinander sind. Sind sie aber nicht, denn wir haben bis hierher gesehen, daß der RGB-Wert jedes Pixels auf der an jeder Sensorstelle gemessenen Größe plus der Größe der benachbarten Sensorstellen beruht. Diese Berechnung kann die Kamera korrekt anstellen für alle Bilddetails, die nicht feiner sind als 0,25 Linienpaare/Pixel (denn es sind maximal 2x2=4 Pixel nötig, um einen vollen Zyklus in Farbe aufzulösen). Nur in der obersten

Abbildungsschärfe II:

Das photographische Auflösungsvermögen

Oktave der Ortsfrequenzen, die die feinsten Bilddetails umfaßt, können Probleme auftreten. Dort können die Algorithmen anhand von manchen SW-Mustern fälschlich Farbe und umgekehrt SW-Information an Farbstrukturen herstellen. Aber das ist relativ selten der Fall, denn es erfordert, daß die Ortsfrequenz ziemlich genau der Nyquist-Frequenz entspricht. Nichtsdestoweniger sind die Fehler sehr störend, wenn sie denn auftreten.

Bayer-Muster Sensoren stellen also genug Informationen bereit, um alle größeren Muster, egal ob SW oder Farbe, korrekt darzustellen und geben, was die Helligkeitsauflösung angeht, im Vergleich zu monochromen (Foveon-) Sensoren keinen Boden auf. Anders wären die oben vorgestellten, direkt gemessenen Auflösungsweite für schwarzweiße Gittermuster, die ja an der Grenze des theoretisch Möglichen liegen, nicht zu erklären.

Theoretisch bringt das Foveon-Design also nur in wenigen Ausnahmefällen Vorteile. Praktisch ist es dem Bayer-Muster im Hinblick auf das Auflösungsvermögen bislang in jedem Fall unterlegen. Das liegt in der Hauptsache daran, daß es Sigma bisher nicht gelungen ist Foveon-Sensoren mit wettbewerbsfähigen Pixelzahlen auf den Markt zu bringen: die SD15 (Sensorgröße 20,7x13,8 mm) bringt es auf

effektiv 2852x1768 Pixel, eine Canon EOS 500D wartet mit 4752x3168 Pixeln bei vergleichbarer Sensorgröße auf. Das hat wohl in erster Linie Kostengründe. Die große Anzahl der produzierten Bayer-Muster Sensoren gestattet einen geringeren Einzelpreis als beim Foveon-Modell und so bekommt man im ersten Fall für's gleiche Geld mehr Pixel, also ein höheres Auflösungsvermögen. Damit ihre Kameras in den verschiedenen Tests auf den ersten Blick nicht erheblich schlechter abschneiden wie vergleichbare Bayer-Muster Kameras, gibt Sigma das Auflösungsvermögen in Linienpaaren pro Pixel und nicht, wie zur besseren Vergleichbarkeit sonst allgemein üblich, in Linienpaaren pro Bildhöhe an. Zudem läßt man bis heute einfach den Anti-Aliasing Filter weg, was zu Moires führt, die vielfach fälschlicherweise als echte Auflösung gedeutet werden. Fakt ist aber, daß das Nyquist-Shannon Abtasttheorem und der Kell-Faktor bei Foveon-Sensoren genauso gelten, wie bei solchen mit Bayer-Muster. Zudem muss man, um den Vergleich fair zu halten, die unterschiedlichen Pixelzahlen bzw. Sensorgrößen berücksichtigen (Formatfaktor, um die Sigma SD15 mit der der Canon EOS 500D zu vergleichen = 1,08). Da ergibt sich für die Canon EOS 500D eine Nyquist-Frequenz von:

$$\frac{4752}{2} = 2376 \text{ LP}$$

muss anhand der Bildergebnisse beurteilen, welche er in Kauf nehmen will.

$$\frac{2376 \text{ LP}}{22,3 \text{ mm}} = 106,5 \text{ LP/mm}$$

Zum Vergleich die Daten der Sigma SD15:

$$\frac{2652}{2} = 1326 \text{ LP}$$

$$\frac{1326 \text{ LP}}{20,7 \text{ mm}} = 64 \text{ LP/mm}$$

$$\frac{64 \text{ LP/mm}}{1,08} = 59,2 \text{ LP/mm}$$

Die Berechnungen sprechen für sich und an den nackten Zahlen geht kein Weg vorbei. Das bedeutet aber nicht, daß die Foveon-Technik grundsätzlich schlecht ist, ganz im Gegenteil. Bei annähernd gleicher Pixelzahl *und* einem Anti-Aliasing Filter wären Kameras mit solchen Bildfängern das Nonplusultra, denn sie würden nicht unter den seltenen, aber störenden, strukturellbedingten Farb-Moires der Bayer-Muster Sensoren leiden. Beide Systeme besitzen also (noch) gewichtige Nachteile und jeder Photograph