

Wissenswertes zur Digitalfotografie

Sensorgroße, Dynamikumfang, Lichtempfindlichkeit, Rauschverhalten

Wie hängt das zusammen?

Wie wirkt sich das aus?

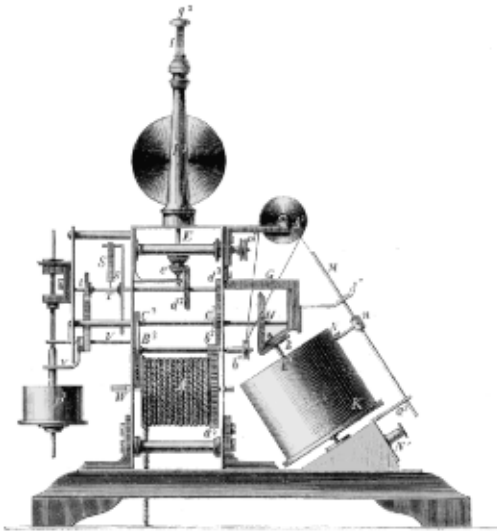
Agenda

- Historisches
 - Von den 1850ern bis heute
- Grundsätzliches
 - Die biologische Kamera
 - Die elektronische Kamera
- Technologie
 - Aufbau moderner Sensoren
 - Fotografische Begriffe – Digital betrachtet
 - Auslesen, Verarbeiten und Speichern
- Die Bedeutung der Sensorgröße
 - Sensorgröße
 - Elektronische Faktoren
 - Optische Faktoren

Historisches: Von der Selenzelle über Vidicon und CCD zu CMOS

Von Zeilen und Punkten

Bereits Mitte des 19 Jahrhunderts entwickelten diverse Erfinder (Bains, Korn, Belin, Bakewell, Caselli u. A.) Methoden um Bilder zu übertragen. Alle basierten auf der Idee, Bildinformation in Zeilen und Punkten zu zerlegen, die Information in elektrischen Strom zu verwandeln, zu übertragen und an der Empfangsstation wieder ein Bild zu erzeugen.

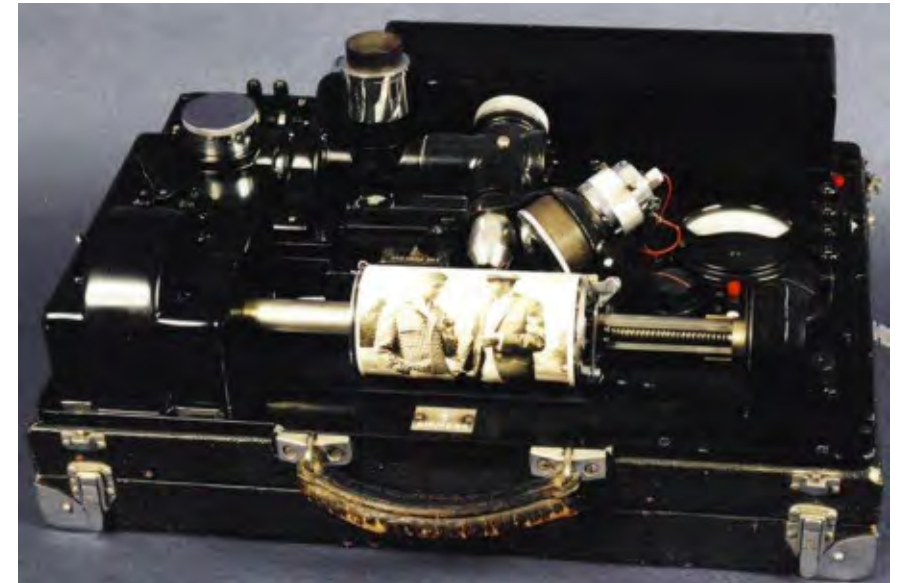


Alexandre Bains, from the Mech. Mag. p. 104, 1850; Dielectric Journal 117, p. 46, 1850; Zetsche, p. 111-113.

Bains, ca. 1850



Belinograph, Anfang 20. Jhdt.



Bildtelegraph nach Korn, 1935

Historisches: Von der Selenzelle über Vidicon und CCD zu CMOS

Vidicon / Aufnahmeröhren

Seit den 30er Jahren entwickelte man Bildaufnahmeröhren. Der Durchbruch kam mit den Vidicon-Röhren ca. 1950, sie blieben bis in die 70er Jahre hinein in Gebrauch.

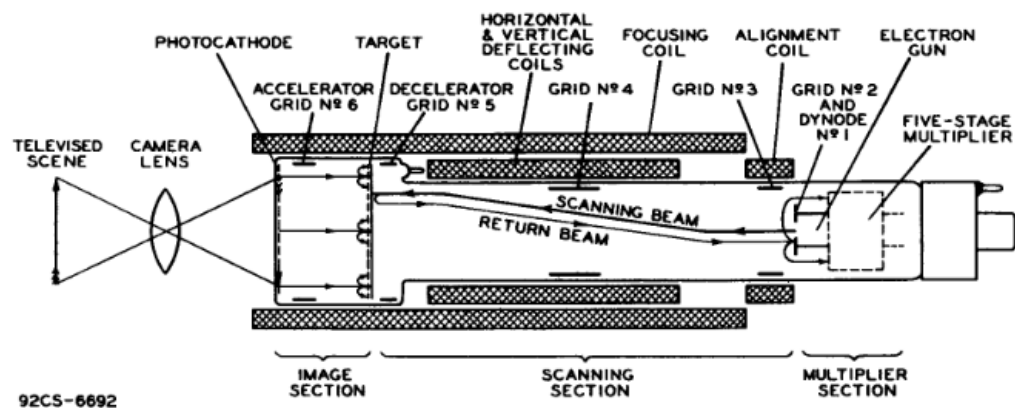


Fig. 1 - Schematic Arrangement of Type 5826.

Prinzipzeichnung RCA Orthicon 5826



Hinten: 4,5" EEV 9224 RCA Orthicon (Nachfolger des 5826),
davor 2/3" Vidicon

Historisches: Von der Selenzelle über Vidicon und CCD zu CMOS

Bildwandlerchips: CCD und CMOS

Der **CCD**- („Charge Coupled Device“) **Bildwandler** wurde in den Bell Labs in 1969 erfunden – zunächst als Speicherbaustein! 1971 folgten erste Linearsensoren (nur eine Reihe Pixel), um ca. 1974 stellte dann Fairchild den ersten 100 x 100 Px „großen“ Sensor her – die Basis für die erste Digitalkamera von Kodak.

Bei den CCDs erfolgt das Belichten auf einmal, das Auslesen der Bildinformation jedoch immer Zeilen- bzw. Spaltenweise, eine Einzelzelle kann nicht adressiert werden, die erforderlichen Schaltungen befinden sich außerhalb des Sensors.

In den 80er und 90er Jahren entstanden erste Labormuster eines Sensors mit „aktiven Pixeln“ (APS), d.h. jeder einzelne Pixel sollte die Umwandlung eines Photons in eine Spannung bewerkstelligen und auch einzeln adressierbar sein. Diese „APS“ werden in der Regel nach dem **CMOS**-Verfahren hergestellt, daher die gängige Bezeichnung. Durch die höhere Integration lassen sie sich billiger herstellen.

Kodak Digicam 1975, entwickelt von Steven J. Sasson

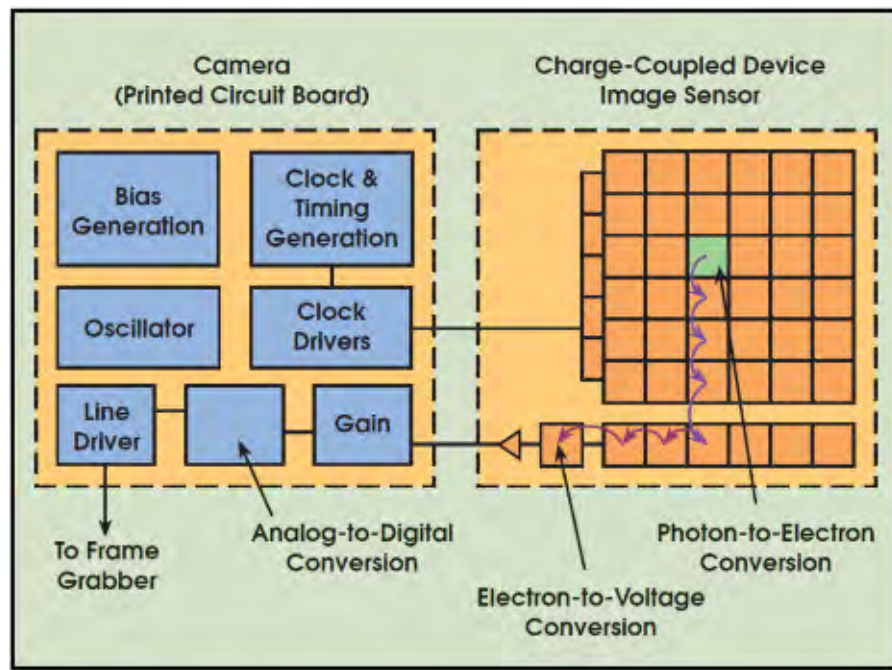


- 100 x 100 Pixel monochrom CCD
- 3,6 kg, „tragbar“
- Speicherzeit: 23 Sekunden/Bild
- Aufzeichnung auf Bandkassette
- Bilder wurden auf (amerikanische) TV-Norm hochgerechnet
- Wiedergabe auf (amerikanischem) Fernseher

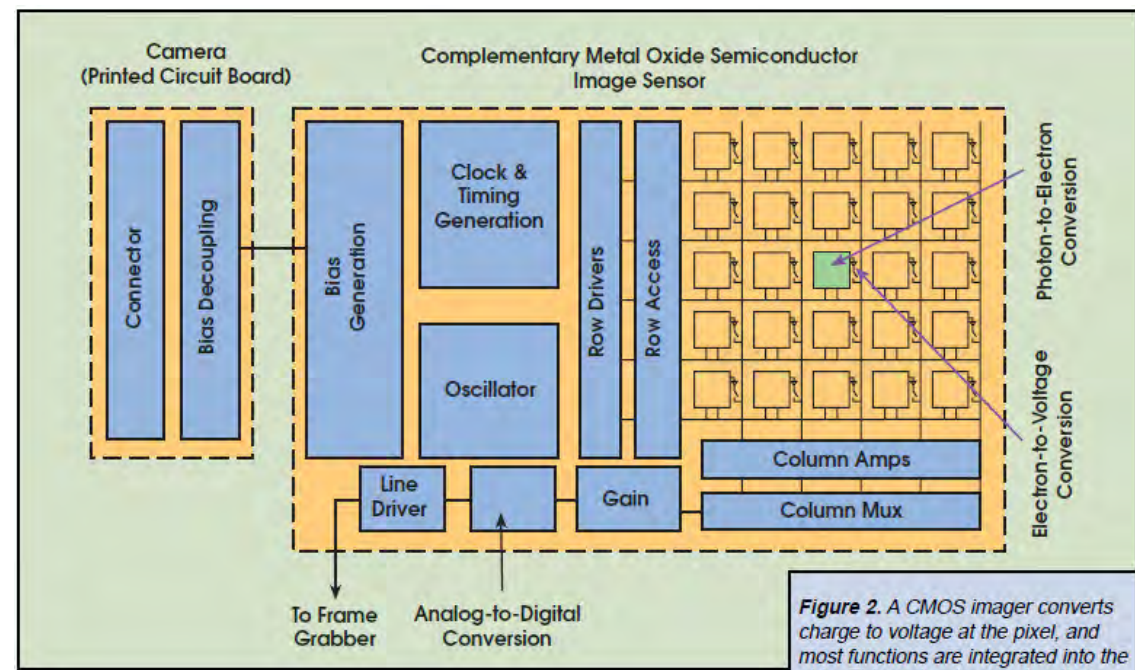
Historisches: Von der Selenzelle über Vidicon und CCD zu CMOS

Bildwandlerchips: CCD und CMOS

Heute haben CMOS-Bildwandler die CCDs in unseren Kameras nahezu komplett verdrängt, die Bildqualität – anfangs beim CMOS immer im Hintertreffen – hat weitestgehend aufgeholt.



Prinzipzeichnung CCD



Prinzipzeichnung CMOS

Figure 2. A CMOS imager converts charge to voltage at the pixel, and most functions are integrated into the chip. This makes imager functions less flexible but, for applications in rugged environments, a CMOS camera can be more reliable.

Die Bio-Kamera: das menschliche Auge



Von Stäbchen und Zäpfchen

- Die Netzhaut enthält ca. 120 Millionen Stäbchen. Diese sind sehr lichtempfindlich (reagieren bereits ab 1 Photon), haben alle dieselbe Farbempfindlichkeit (ca. 500nm, blaugrün) und leiten ihr Signal gruppiert an Ganglien weiter – daher liefern sie ein monochromes, und nicht ganz scharfes Bild.
- Für das Farbsehen sind die Zapfen verantwortlich, davon hat der Mensch nur 6 Millionen (pro Auge). Die Zapfen sind viel weniger lichtempfindlich (mindestens 200 Photonen), sind aber „einzeln verschaltet“.
 - L-Zapfen (L für Long) sind für längere Wellenlängen empfindlich. Das Absorptionsmaximum liegt etwa bei 560 nm, was einem grünlichen Gelb entspricht.
 - M-Zapfen (M für Medium) sind empfindlich für mittlere Wellenlängen. Das Absorptionsmaximum liegt hier bei etwa 530 nm, entsprechend einem Gelbgrün.
 - S-Zapfen (S für Short) sind für kürzere Wellenlängen empfindlich. Das Absorptionsmaximum liegt etwa bei 420 nm, einem Blau. S-Zapfen sind beim Menschen nur mit einem Anteil von zwölf Prozent aller Zapfen vertreten.
- Das Farbsehen ergibt sich aus einer komplexen Differenz- und Summenverrechnung der Information aus den Zapfen.

Die Bio-Kamera: das menschliche Auge

Farbsehen vs. Hell-Dunkel-sehen – oder „Nachts sind alle Katzen grau“

- Im hellen Licht sind die Stäbchen übersättigt und tragen zum Sehempfinden des Menschen gar nicht bei, der gesamte Seheindruck stammt von den Zapfen. Da diese einzeln verschaltet sind, kann auch die Bildinformation eindeutig und punktgenau vom Gehirn verortet werden – so sehen wir ein scharfes und buntes Bild.
- Je dunkler das Licht, desto weniger Information können die Zapfen beitragen, dafür kommen die Stäbchen ins Spiel. Dies ermöglicht uns zwar auch im Dunkeln eine Bildwahrnehmung, diese ist jedoch unbunt und unscharf – da ja mehrere Stäbchen gemeinsam über ein Ganglion ihr Signal weiterleiten.
- Die maximale Schärfe die das menschliche Auge bei optimalen Lichtverhältnissen auflösen kann, entspricht im Idealfall ca. eine Winkelminute. Dies ermöglicht es uns, zwei Punkte als getrennt zu erkennen, wenn diese mindestens 2 Winkelminuten voneinander entfernt liegen. Betrachten wir ein Bild bei einem üblichen Betrachtungsabstand, so erscheint uns die Bilddiagonale unter einem Sehwinkel von ca. 50° bzw. 3000 Winkelminuten. Bei einer Unschärfe, die 2 Winkelminuten, also $1/1500$ der Bilddiagonalen übersteigt, werden wir eine Unschärfe also gerade zu erkennen beginnen.

Die elektronische Kamera

Das Äquivalent zu den Stäbchen und Zapfen sind in der Digitalkamera die Pixel – egal nun, ob CCD oder CMOS. Als Pixel bezeichnen wir eine einzelne Rezeptorzelle, welche in der Lage ist, aus Licht (Photonen) elektrische Signale zu erzeugen.

- Vereinfacht können wir uns einen Pixel wie einen Eimer vorstellen, der Photonen auffängt. Wenn zu viele Photonen hineinkommen, „läuft der Eimer über“ – der Pixel ist gesättigt.
- Je nach Größe des Pixels kann er unterschiedlich viele Photonen auffangen, und ein dem Füllstand entsprechendes Signal erzeugen („Dynamikumfang“)
- Die Lichtempfindlichkeit eines Pixels deckt ein großes Spektrum von Lichtfarben (Wellenlängen) ab – vom Infrarot bis Ultraviolett

Die elektronische Kamera

Die verwendeten Bildwandler haben ihre Eigenheiten und Probleme. Neben den Pixeln sind weitere elektronische Komponenten enthalten, und auch das Chipmaterial selber hat besondere Eigenschaften:

- **Pixel können defekt sein** – sie können entweder gar keine Photonen aufnehmen („kaltes Pixel“), oder durch einen Kurzschluss ein Dauersignal abgeben („heißes Pixel“). Mit der Alterung der Chips nehmen diese Defekte i.d.R. zu.
- Außer den Photonen können auch die verschiedenen elektrischen Ladungen im Grundmaterial des Chips, sowie externe Einstrahlungen, Signale erzeugen – **man spricht hier vom Rauschen**. Auch die zur Verstärkung erforderlichen Schaltungen erzeugen ein Rauschen. Dieses Fehlverhalten ist bei den meisten Kameras auch stark Temperaturabhängig.
- Je nach Bauart (bei CCD) kann eine **Überbelichtung** eines Pixels zu einem „Überlaufen“ in die benachbarten Pixel führen – man spricht hier von „Überstrahlen“ oder „Schmieren“.

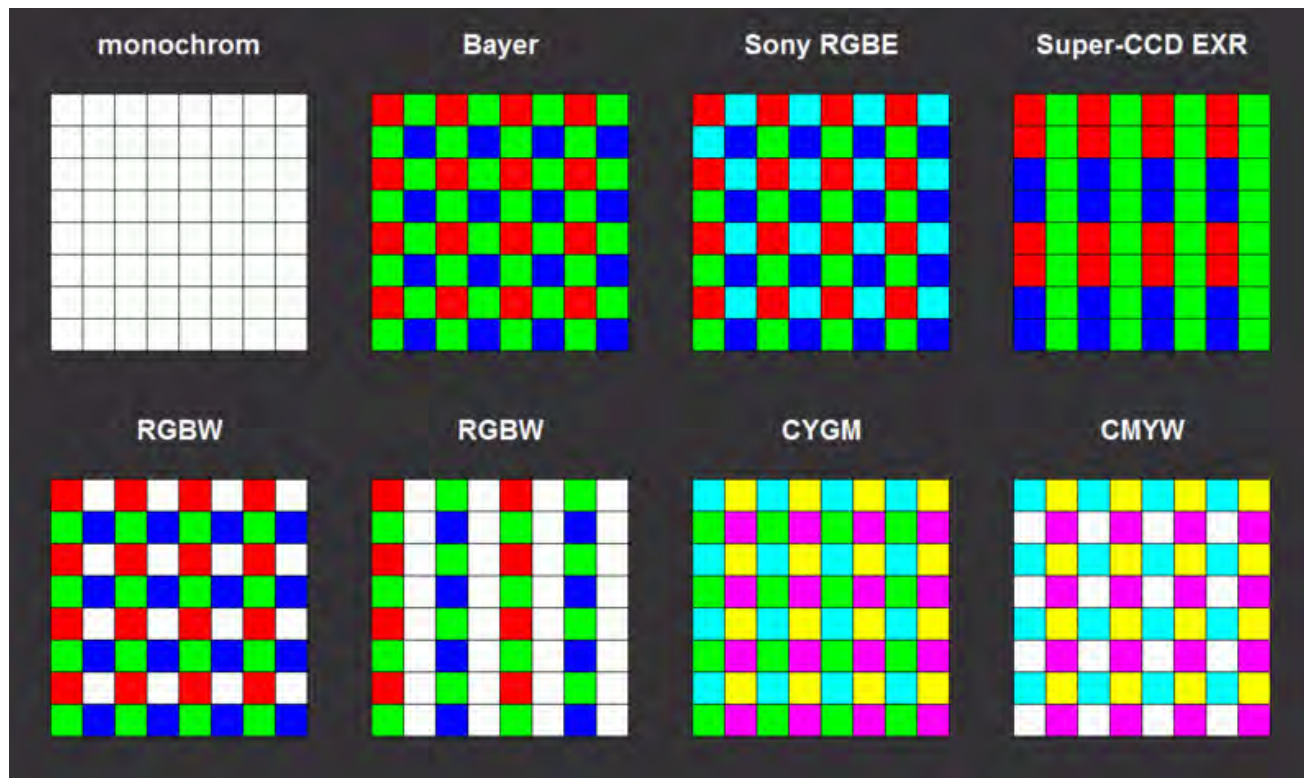
Farbbilder - wie werden Pixel bunt?

Ein Bildwandler „sieht“ von Haus aus alle Farben gleich. Es muss also technisch für das differenzierte Farbsehen gesorgt werden. Dies geschieht entweder durch das Vorschalten von Filtern oder durch Aufteilung der Bildinformation auf mehrere Sensoren / Sensorflächen.

- Einzelner Bildwandler mit vorgeschaltetem Filter
- 3-CCD-Lösung
- Foveon
- Serielle Belichtung

Filter

Vor der Sensoroberfläche befindet sich ein Filter. Dessen Farbfelder werden je nach dem Verwendungszweck unterschiedlich angeordnet, für die gängigen Digitalkameras wird meistens das **Bayer-Muster** (nach Bryce E. Bayer, 1975, Kodak) verwendet. Die erhöhte Anzahl grüner Pixel (R=25:G=50:B=25) trägt dem Farbempfinden des menschlichen Sehens Rechnung. Die grünen Pixel werden auch „Lumineszenz-Pixel“ genannt.

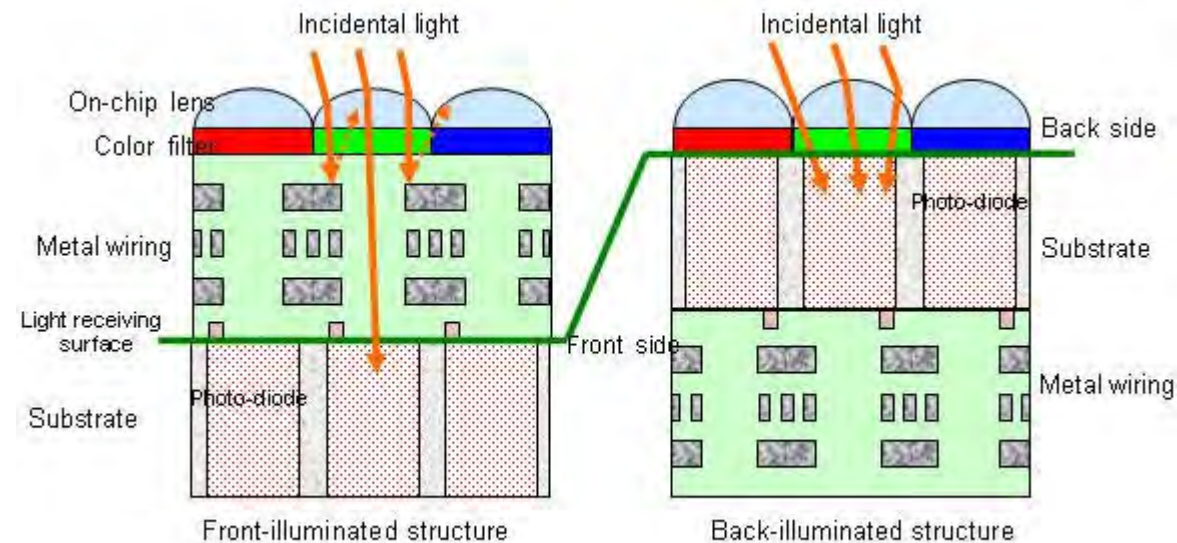


Zitat Wikipedia:

„Grün ist in der Flächenzuweisung (somit in der Auflösungsfähigkeit) privilegiert, da Grün (bzw. der Grün-Anteil in Grautönen) im menschlichen Auge den größten Beitrag zur Helligkeitswahrnehmung und somit auch zur Kontrast- und Schärfe-Wahrnehmung leistet: 72 % der Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung von Grautönen wird durch dessen Grünanteil verursacht, dagegen leistet Rot nur 21 % und Blau nur 7 %. Zudem ist Grün, als die mittlere Farbe im Farbspektrum, diejenige, für die Objektive i. d. R. die höchste Abbildungsleistung (Schärfe, Auflösung) liefern.“

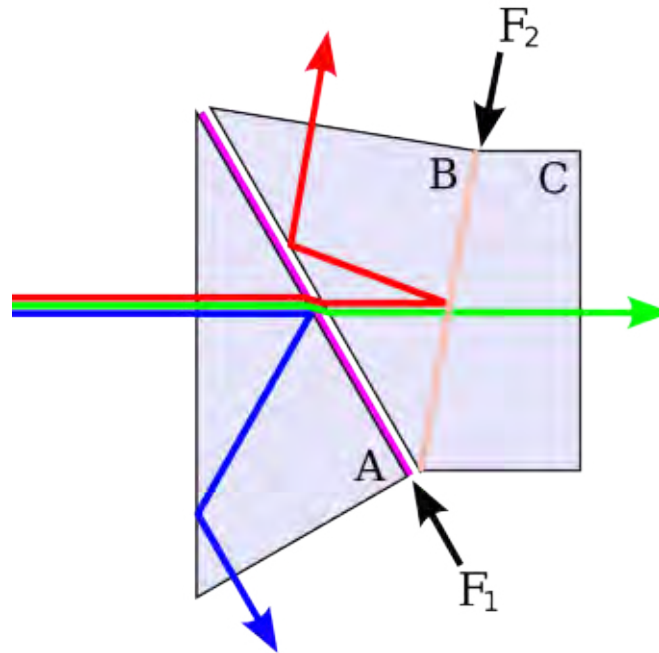
Aufbau eines modernen Sensors

Durch eine Anzahl von Maßnahmen konnte die Bildqualität der Sensoren erheblich gesteigert werden. Verbesserte Fertigung erlaubt höhere Pixelzahlen, neue Layouts optimieren die optischen Eigenschaften:



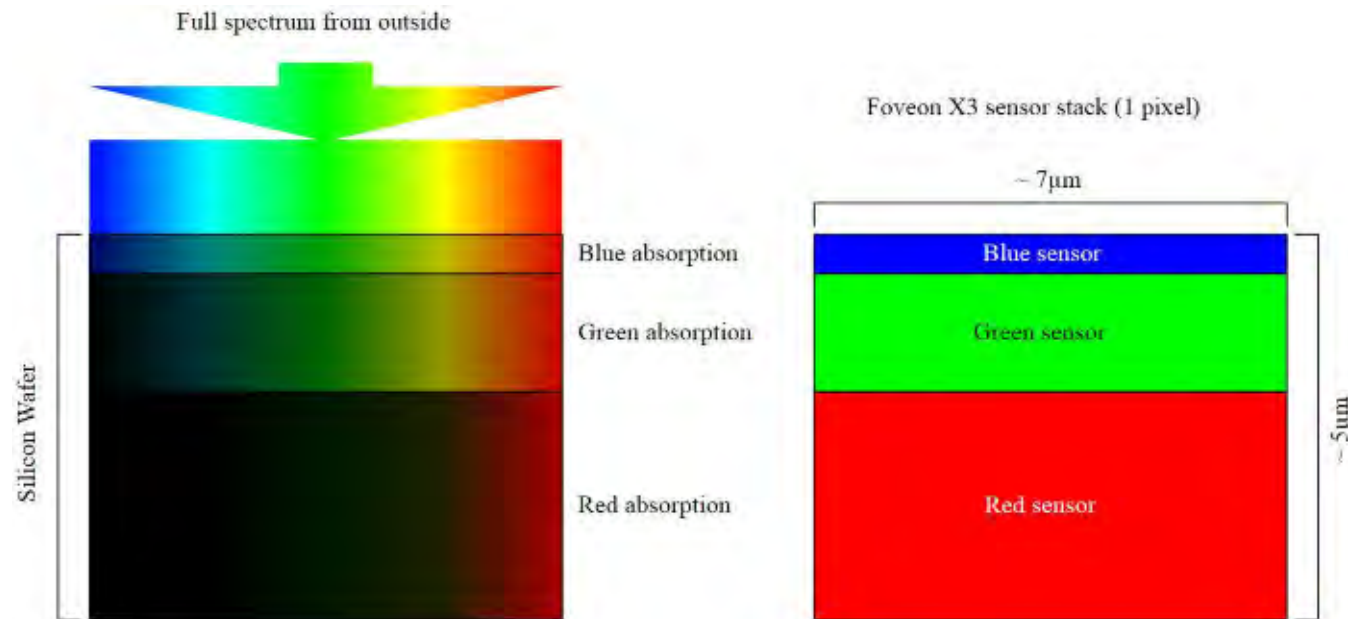
3-CCD

Das einfallende Licht wird durch Prismen in seine drei Bestandteile Rot-Grün-Blau zerlegt, jeder Farbe ist ein eigener Bildwandler zugeordnet.



Foveon-X3

Als einziger Kamerahersteller setzt Sigma den Foveon-X3-Sensor ein. Hier liegen drei lichtempfindliche Schichten untereinander. Es wird ausgenutzt, dass Lichtwellen – je nach Frequenz – unterschiedlich tief in das Siliziummaterial eindringen können. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass der Chip nicht die erwartete Farbreinheit bringt, und bedingt durch das schwache Lichtsignal eine stärkere Verstärkung erfolgen muss, welches zwangsweise mehr Rauschen bedingt.



Serielle Belichtung



Primär für Studioaufnahmen: das Bild wird drei Mal hintereinander mit jeweils eigenen Rot-, Grün- und Blau-Filtern belichtet; am ehesten bei Digitalrückwänden für Mittelformat- und Fachkameras zu finden.

Zitat Sinar-Website (History):

„2001 Sinarback HR mit Microscanning

Die patentierte Piezoplatte des Sinarbacks erlaubt hochpräzise Bewegungen in Halbpixelschritten.

Zusammen mit dem Sinar Macroscan wächst die Auflösung bis zu 78 Millionen Pixeln.“

Die Dosis macht's – die richtige Menge an Licht...

Wie beim analogen Film müssen wir auch bei Bildwandlern die einfallende Menge an Licht genau dosieren. Was beim Film die *Filmempfindlichkeit*, ist beim Pixel die *Lichtempfindlichkeit* der Pixel. Die Bandbreite der Lichtempfindlichkeit eines Pixels kann durch eine Verstärkung des elektrischen Signals erweitert werden – allerdings werden auch die störenden Rauschsignale verstärkt, und auch der Verstärker selber kann das Signal verzerren und verrauschen.

Nach „unten“ – also um den Sensor besonders unempfindlich zu machen – können ND-Filter (neutralsdichte Filter) eingesetzt werden.

Zur Dosierung der Lichtmenge kann entweder die Dauer der Einwirkung (Belichtungszeit) oder die Menge des einfallenden Lichts (Blende) hergenommen werden.

(vereinfachte) Definition **Lichtwerte** (LW):

"...eine definierte Menge an Licht, welche sich durch die Kombination aus Blende und Belichtungszeit ergibt"

Blende & Verschlusszeiten

Die **Blende** unterscheidet sich bei Digitalkameras nicht von Analogkameras.

Die **Verschlusszeit** wird durch den Verschluss gesteuert. Theoretisch benötigt ein Bildwandler keinen mechanischen Verschluss, er kann rein elektronisch gesteuert werden. Da aber dies nicht besonders schnell und nicht präzise genug verläuft, wird in der Regel bei Fotokameras immer noch ein mechanischer Verschluss verbaut.



Was danach kommt: Auslesen, Verarbeiten und Speichern

Das elektronische Abbild, welches der Bildwandler liefert, wird nun durch den „Bildprozessor“ bearbeitet. Je nach Kamera werden die unterschiedlichsten Schritte durchlaufen, diese können z.B. sein:

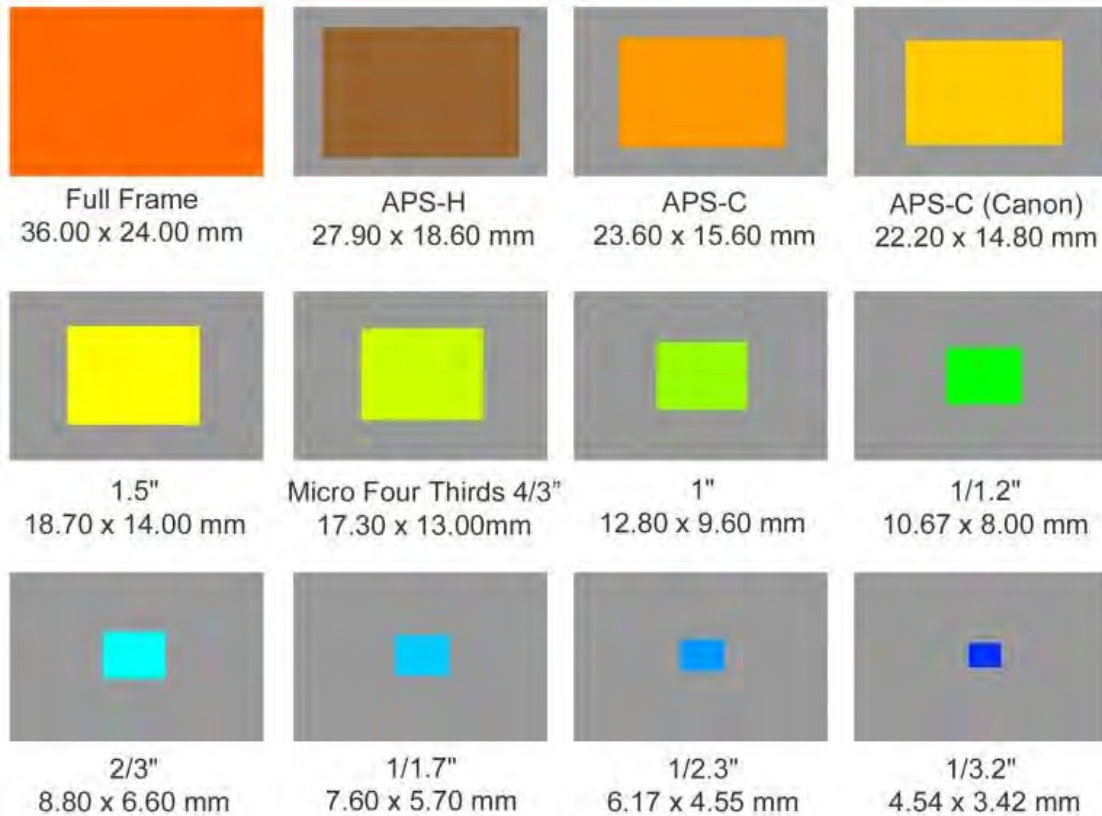
- Bereinigung von Pixelfehler
- Korrektur von Objektiv-Verzeichnung
- Farb- und Kontrastabgleich
- Schärfung
- Optimierung des Dynamikumfanges
- Zuordnung zu einen definierten Farbraum (sRGB, Adobe, NTSC, PAL, ...)
- Komprimierung
- Speichern

Diese Schritte sind z.T. auch vom gewählten Speicherformat abhängig, die am wenigsten „ver-“ oder „be-“arbeitete Daten sollten im RAW-Format vorliegen.

Welche Bedeutung hat die Sensorgröße?

- Elektronisch betrachtet
- Optisch betrachtet

Sensorgröße und Bezeichnung



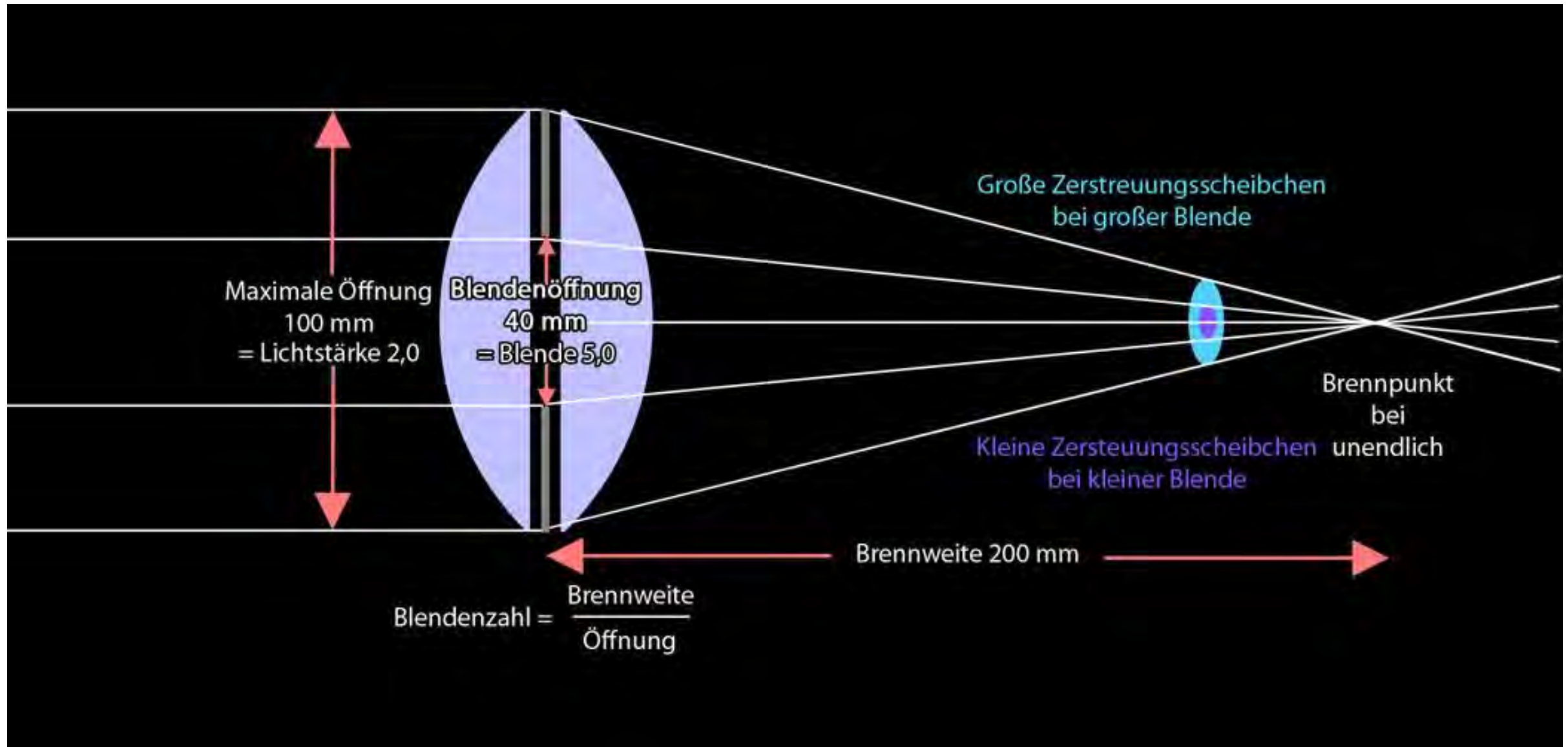
Zitat Wikipedia:

„...Neben der direkten metrischen Angabe der aktiven Fläche (z. B. 16 mm × 24 mm) hat sich die Tradition aus der Zeit der Bildaufnahmeröhren erhalten, in der der Außendurchmesser des Glaskolbens in Zoll (z. B. 2/3") zur Größenangabe verwendet wurde. Allerdings war die lichtempfindliche Fläche der Röhren deutlich kleiner als der Außendurchmesser der Röhren: So hatte beispielsweise eine 1"-Röhre eine aktive Fläche mit einer Bilddiagonalen von ca. 16 mm. Ein 1"-CCD-Chip hat per Definition die gleiche Bilddiagonale wie eine 1"-Röhre.“

Einige Bauernregeln...

- Je höher die Dichte (Anzahl pro Fläche), umso kleiner das Pixelchen
- Je größer ein einzelner Pixel, desto mehr Photonen kann er einfangen, umso besser also die Lichtempfindlichkeit
- Je mehr Licht ein Sensor einfängt, desto weniger muss verstärkt werden: geringeres Rauschen
- Für ein optimales Ergebnis müssen Pixelgröße, Pixelversatz („Pitch“) und Sensorgröße mit den verwendeten Objektiven (Bildkreis, Auflösung) abgestimmt werden
- Konsequenz: Es gibt keine ideale Sensorgröße bzw. Auflösung: es hängt immer vom Zweck ab – siehe folgendes Beispiel:
 - Sony A7 – 24,3 Mp; A7s – 12,2 Mp; A7R – 36,4 Mp ...aber alle mit Vollformat-Sensor

Optisch betrachtet



Optisch betrachtet

- der Cropfactor – auf Deutsch “Beschnittfaktor“
 - Er gibt das Verhältnis der effektiven Sensordiagonalen im Vergleich zum Kleinbildformat wieder
 - Ein Kleinbildobjektiv mit 100mm Brennweite und einer Lichtstärke von 2,8 wirkt bei einer APS-C Kamera (Cropfaktor 1,5) wie ein Objektiv mit 150mm bei Blende 4!
 - Je kleiner der Sensor, desto größer die Schärfentiefe
- die Schärfentiefe
 - Der Mensch sieht nicht nur die physikalisch perfekt eingestellte Schärfeebene scharf, sondern auch einen Bereich davor und dahinter – solange die einzelnen „Scheiben“ eine bestimmte Größe nicht übersteigen. In der Literatur werden „Scheibendurchmesser“ von $1/1500$ bis $1/3000$ der Bilddiagonale genannt (siehe auch die Schärfeleistung des menschlichen Auges!)

KB: 36 mm/Bl. 5,6



Dig.-Kompakt:
9 mm/Bl. 5,6





Bildnachweise

1. European Patent Office, Public Domain; http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bain_improved_facsimile_1850.png
2. (Inv.Z801 coll. Météo-France, P. Taburet ; http://files.meteofrance.com/files/institutionnel/cnam/fiche/zoom_o_2001d020_l_2.htm
3. (cc) by-nc-sa, Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, RWTH; <http://www.bayern-online.com/v2261/artikel.cfm/203/Bild-Telegraf.html>
4. <http://frank.pocnet.net/sheets/079/5/5826.pdf>
5. 9224vidicon, <http://www.crtsite.com/image/9224vidicon.jpg>
6. Kodak Kamera – Bildrechte: Image credits: Photograph by Eastman Kodak; (<http://petapixel.com/2010/08/05/the-worlds-first-digital-camera-by-kodak-and-steve-sasson/>)
7. Kodak Wiedergabegerät – Bildrechte: Image credits: Photograph by Eastman Kodak; (<http://petapixel.com/2010/08/05/the-worlds-first-digital-camera-by-kodak-and-steve-sasson/>)
8. Reprinted from the January 2001 issue of PHOTONICS SPECTRA © Laurin Publishing Co. Inc.
(https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.teledynedalsa.com%2Fpublic%2Fcorp%2FPhotonics_Spectra_CCDvsCMOS_Litwiller.pdf&ei=XcqNVIKuKsqfPcCpgdgD&usg=AFQjCNEw9Ae-PWcDa-TsOgsmWPQShKI_RQ&bvm=bv.81828268,d.ZWU&cad=rja)
9. Reprinted from the January 2001 issue of PHOTONICS SPECTRA © Laurin Publishing Co. Inc.
(https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.teledynedalsa.com%2Fpublic%2Fcorp%2FPhotonics_Spectra_CCDvsCMOS_Litwiller.pdf&ei=XcqNVIKuKsqfPcCpgdgD&usg=AFQjCNEw9Ae-PWcDa-TsOgsmWPQShKI_RQ&bvm=bv.81828268,d.ZWU&cad=rja)
10. Menschliches Auge (Foto: M. Rajkay)
11. Filtermuster – Kein Copyright - (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/03/CFA_Pattern_fuer_quadratische_und_rechteckige_Pixel.png/800px-CFA_Pattern_fuer_quadratische_und_rechteckige_Pixel.png)
12. Hintergrundbelichtung – Sony Pressemeldung 2008 (<http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/>)
13. Drei Prismen Public Domain (http://en.wikipedia.org/wiki/Three-CCD_camera#mediaviewer/File:Color_Separation_Prism.jpg)
14. Schema der Prismenanordnung – Public Domain – (<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dichroic-prism.svg>)
15. 3CCD-Block – GNU – (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/A_3CCD_imaging_block.jpg)
16. Foveon – GNU – (<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Absorption-X3.svg>)
17. Sinar Rückteil 2001 (http://www.dcvIEWS.com/specs/images/si_23f.jpg)
18. Schlitzverschluss (Quelle: Canon) (<http://digicam-experts.de/faq/15>)
19. Sensorgößen *All content copyright © Gizmag 2003 – 2014* (<http://www.gizmag.com/camera-sensor-size-guide/26684/pictures#1>)
20. Strahlengang (Beispiel) Heise (<http://www.heise.de/foto/artikel/Die-Blende-228699.html>)
21. Bilder zur Schärfentiefe: Amateurfotografen, veröffentlicht in ProPhoto (<http://www.prophoto-online.de/digitalfotografie/Sensorgroesse-Schaerfentiefe-10001071>)