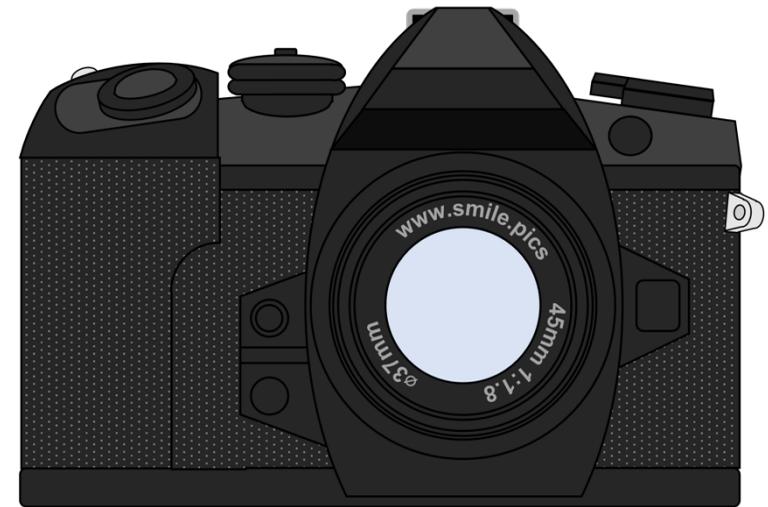
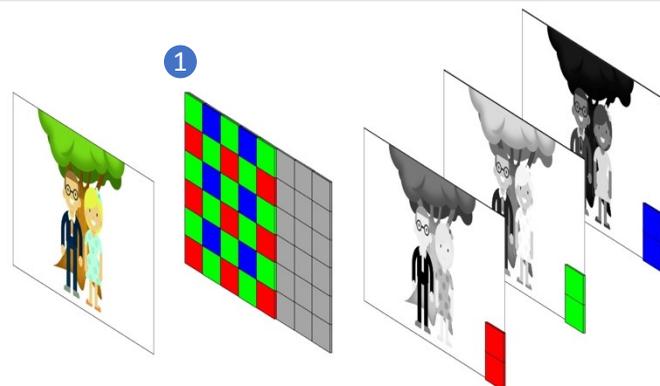


Willkürliche Auswahl technischer Aspekte der Digitalfotografie



Inhalte werden fallweise ergänzt/korrigiert werden. Die aktuelle Fassung immer unter
<https://www.smile.pics/schummelbuch>

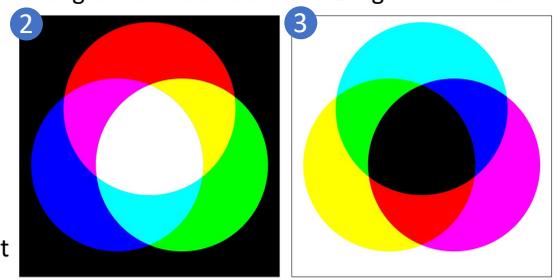




Der Sensor eines Fotoapparats ist prinzipiell farbenblind, er misst nur die Menge des Lichts, die auf ihm aufprallt. Durch den inneren photoelektrischen Effekt entsteht in einem Halbleiter (dem Sensor) eine messbare elektrische Spannung. ① Damit der Fotoapparat trotzdem mehr „Farben“ erkennen kann als weiß, grau in allen Schattierungen und schwarz, schaltet man dem Sensor ein Muster aus Farbfiltern vor. Diese Filter sind rot, grün und blau (RGB)- [S.11](#)

Im Prinzip kann jede sichtbare Farbe aus drei Grundfarben hergestellt werden. „Grundfarben“ liegen dann vor, wenn keine der drei Farben aus einer Mischung der anderen beiden erzeugt werden kann.

Wenn das gegeben ist, ist es egal, welche drei Farben man nimmt. Dabei gibt es zwei Arten der Farbmischung: ② Die additive Farbmischung wie beim Monitor, wo drei leuchtende Bildpunkte in den Farben RGB im Auge bzw. Gehirn des Betrachters addiert werden ③ Die subtraktive Farbmischung wie beim Druck. Dabei werden zB Tinten aus Cyan (ein Art Türkis), Magenta (eine Art Rosa) und Yellow (englisch für gelb) überlagert.

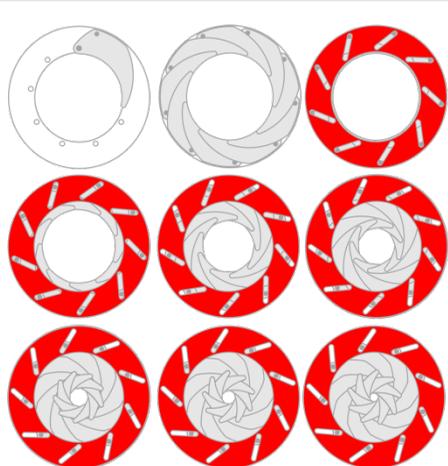


Damit der Kontrast stärker rauskommt gibt man noch Schwarz dazu (CMYK). Man bearbeitet ein RAW Bild am Monitor ④ (additive Farbm.) zB. Weißabgleich, um es dann ⑤ am Drucker (subtraktive Farbm.) auszugeben. Ob die Farben am fertigen Foto ⑥ stimmen, hängt also von einer ganzen Kette von Faktoren ab. ZB kann das Fotopapier nicht wie in ③ ideal weiß sein, sondern eine Eigenfarbe haben wie in ⑦.



Speziell für das Problem mit Drucker und Papier kann man sich Profile für die Kombination aus eigenem Drucker und Druckerpapier erstellen (lassen). Um über den gesamten Prozess von der Bilderstellung bis zur Bildwiedergabe eine konsistente Farbwiedergabe produzieren zu können, hat man sich darauf geeinigt, nur einen Teil des Farbraums zu nutzen, den dafür aber sauber wiederzugeben. Zwei bekannte Teilfarbräume sind zB. sRGB und AdobeRGB.

Der gesamte Prozess von der Bilderstellung bis zur Bildwiedergabe eine konsistente Farbwiedergabe produzieren zu können, hat man sich darauf geeinigt, nur einen Teil des Farbraums zu nutzen, den dafür aber sauber wiederzugeben. Zwei bekannte Teilfarbräume sind zB. sRGB und AdobeRGB.

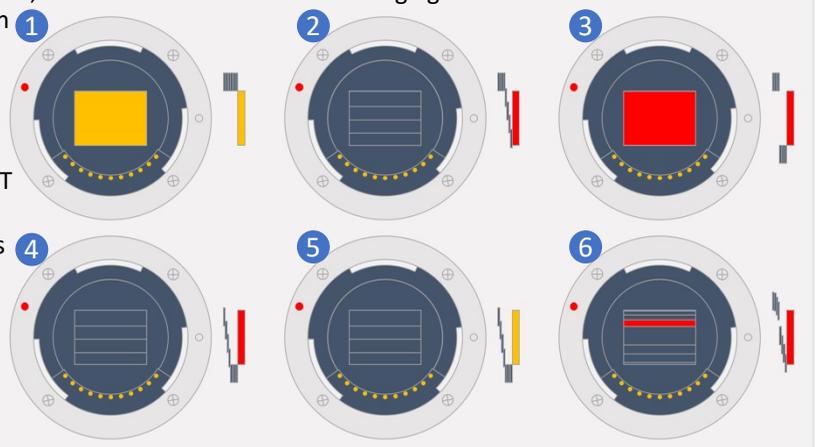


Die **Irisblende** ist ein mechanischer Bauteil, den man in den meisten Wechselobjektiven findet. Man kann damit prinzipiell stufenlos den Durchmesser des Lochs der Blende (bzw. dessen Fläche) einstellen. Eine Irisblende besteht aus mehreren Lamellen mit Mitnahmestiften, einem Ring, der die Lamellen aufnimmt und einem weiteren (hier rot dargestellten) Steuerring. Der Steuerring hat Ausnehmungen für die Lamellenmitnahmestifte. Je nach Verdrehwinkel des Steuerrings werden die drehbar montierten Lamellen verstellt und somit die Lochgröße eingestellt. Links oben sieht man eine einzelne am Aufnahmering montierte Lamelle, daneben das komplette Set (hier 9 Stück) der montierten Lamellen.

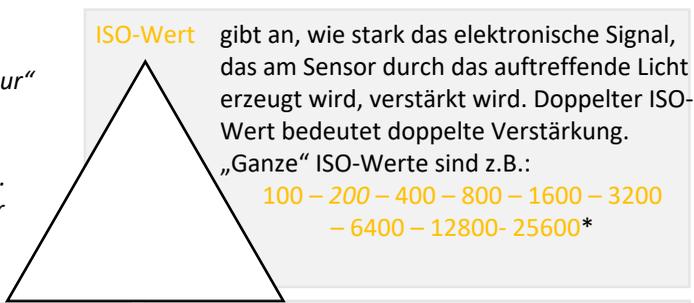
Im dritten Bild oben ist dann der Steuerring schon montiert, die weiteren Bilder zeigen diverse Blendenstellungen an. Obwohl prinzipiell stufenlos einstellbar werden nur ausgewählte Stellungen durch die Steuerelektronik eingestellt. Mehr dazu siehe z.B. „Belichtungs-dreieck“ (auf [Seite 04](#)).

Der **Schlitzverschluss** regelt die Belichtungszeit, also wie lange Licht auf den Sensor trifft. Dieses Bauteil ist ein Auslaufmodell, das es vermutlich nicht mehr lange geben wird. Sobald die Sensoren schnell genug elektronisch

ausgelesen werden können, wird dieser Teil (ähnlich dem Spiegel der Spiegelreflexkameras) verschwinden und ist es zT bereits. Wir sehen hier rechts sechs Zustände des Schlitzverschlusses. Dargestellt ist jeweils der Sensor von vorne (frei oder durch den Schlitzverschluss verdeckt) und von der Seite. Von der Seite sehen wir den Schlitzverschluss mit seinen beiden Verschlussvorhängen (wie zwei Eiserne Vorhänge eines Theaters) besser. Beginnen wir bei ①, dem Grundzustand. Beide Verschlussvorhänge sind in der Grundposition, der Sensor zeichnet im Moment nicht auf (gelb). Unmittelbar vor ② wird ausgelöst. Der erste Verschlussvorhang deckt den Sensor ab, der Sensor wird auf Aufnahme (rot) gestellt, d.h. das Signal wird nicht nur am Display angezeigt sondern gepuffert und dann in der Folge nach einer gewissen Nachbearbeitung auf eine Speicherkarte (zB SD oder CF) gespeichert. Bei ③ ist der erste Verschlussvorhang geöffnet. Das bleibt er, bis die voreingestellte Belichtungszeit abgelaufen ist. Dann (bei ④) schließt der zweite Verschlussvorhang und der Sensor wird wieder (bei ⑤) aus dem Aufnahmemodus (rot) in den Anzeigemodus (gelb) gestellt. Danach geht der Sensor wieder in den Zustand ①. Bei ⑥ sehen wir etwas anderes. Bei besonders kurzen Verschlusszeiten muss der 2. Verschlussvorhang schon mit dem Schließen beginnen, während der 1. noch öffnet. Die längste Zeit, wo das noch nicht notwendig ist, wo es einen Zustand wie bei ③ gibt, ist die Blitzsynchronisationszeit.



Blende und **Belichtungszeit** sind Parameter, die die Menge des am Sensor auftreffenden Lichts „echt“ regeln. Der **ISO-Wert** hingegen ist „nur“ eine Kennzahl für die elektronische Verstärkung der Sensorsignale (die Empfindlichkeit wird nicht!!! erhöht). Das Zusammenspiel der 3 Parameter nennt man **Belichtungs-dreieck**



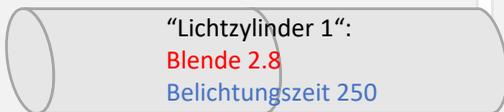
Blende A

regelt die Größe einer annähernd kreisförmigen Öffnung durch die Licht auf den Sensor/Film kommt. Wird als Bruchteil der Brennweite angegeben, d.h. je kleiner die Zahl, umso größer die Blendenöffnung. Die Werte „ganzer“ Blenden **1 – 1.4 – 2 – 2.8 – 4 – 5.6 – 8 – 11 – 16 – 22*** sind so gewählt, dass sich die Fläche der Blendenöffnung von einer Blendenzahl zur nächsten halbiert bzw. in die andere Richtung verdoppelt.

Belichtungszeit T (oder S)

gibt an, wie lange das Licht auf den Sensor/Film auftreffen darf. Die Werte „ganzer“ Belichtungszeiten verdoppeln sich jeweils, bzw. halbieren sich in die andere Richtung. Die Werte „ganzer“ Belichtungszeiten sind zB. **2000 – 1000 – 500 – 250 – 125 – 60 – 30 – 15 – 8 – 4 – 2 – 1'' – 2'' – 4''*** Dabei werden Werte ab einer Sekunde mit '' angezeigt, darunter nicht. D.h. **2** bedeutet 1/2s (eine halbe Sekunde), **2''** bedeutet 2s.

Blende und **Belichtungszeit** legen gemeinsam fest, wie viel Licht für ein Foto am Sensor ankommt. Man kann sich das vorstellen wie einen "Lichtzylinder". Die Blende gibt den Durchmesser an und die Belichtungszeit die Höhe des Zylinders (quasi wie Lichtgeschwindigkeit mal Zeit)

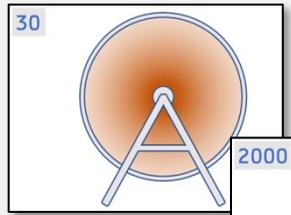


Die Volumina der beiden "Lichtzylinder" sind gleich, doppelte/halbe Fläche, aber halbe/doppelte Länge. Während die „Lichtmenge“ also gleich ist, wären zwei Fotos mit diesen Einstellungen doch recht unterschiedlich (obwohl beide „richtig“ belichtet wären, also nicht zu hell oder dunkel).



Unschärfer Hintergrund bei großer Blende (z.B. 1.4)

Scharfer Hintergr. bei kleiner Blende (z.B. 11)



Bewegungsunschärfe bei langer Belichtungszeit (z.B. 30 = 1/30s)



Bewegung eingefroren bei kurzer Zeit (z.B. 2000 = 1/2000s)



Vielleicht hast Du schon einmal ein Bild mit unnatürlichem Farbstich gesehen wie in Bild 1. Das Bild hat einen Grünstich, verursacht durch die Blätter des Baumes, die das reflektierte Licht grün färben. Da unser Gehirn diese Grünfärbung automatisch korrigiert, fällt uns das uU gar nicht auf, während wir fotografieren. Beim Betrachten des Fotos schon. Eigentlich sollte es aussehen wie Bild 2. Vor allem wenn man in JPEG fotografiert, sollte man den Weißabgleich (d.h. das Einstellen der Kamera auf die Farbtemperatur des vorhandenen Lichts) vor dem Fotografieren einstellen. Bei RAW kann man das „später“ machen, bei der Bearbeitung am Computer mit einem RAW-Konverter.

Farbtemperatur

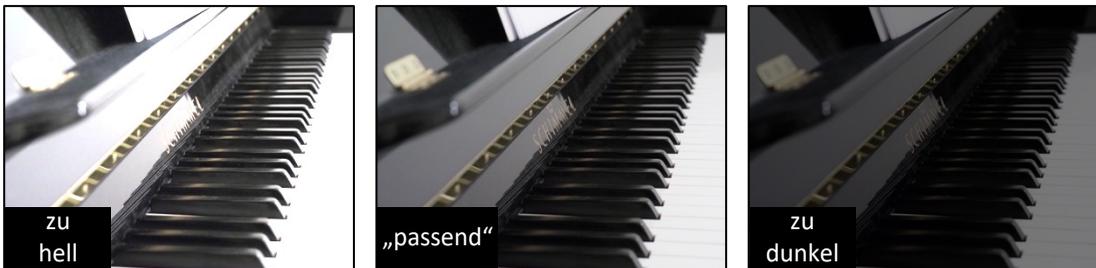
Hast Du schon einmal einem Hufschmied bei der Arbeit zugesehen? Bei einem der Arbeitsschritte wird ein Hufeisen erhitzt. Bei etwa 700°C beginnt das Hufeisen dunkelrot zu glühen, bei 800°C glüht es hellrot, bei 1100°C gelb. Die Hufeisentemperatur für dunkelrot ist also 700°C („Das Dunkelrot, wie die Farbe, die ein Hufeisen bei 700°C hat“), die bei gelb 1100°C („Das Gelb, wie die Farbe, die ein Hufeisen bei 1100°C hat“). So ungefähr funktioniert das. Bei der „Farbtemperatur“ wird aber nicht ein Hufeisen als Bezugsmaßstab hergenommen, sondern ein „idealer Schwarzer Strahler“. Stelle Dir den als einen schwarzen Ofen vor, der sehr heiß werden kann und der ein kleines Loch hat, wo Du reinschauen kannst. Je nach Temperatur glüht er in verschiedenen Farben. Diese Farben werden nach der jeweiligen Temperatur benannt. Aber nicht in Grad Celsius, sondern in Kelvin, einer anderen Temperaturskala. Deshalb heißt es Farbtemperatur.



Wenn man einen automatischen Weißabgleich (AWB) macht, dann sucht sich die Kamera die hellste Stelle am Sensor und regelt Farben so nach, dass diese Stelle weiß ist und zB nicht grün. Bei einem individuellen Weißabgleich kann man sich zB ein weißes Blatt Papier in die Kamera halten (lassen) und den Weißabgleich laut Bedienungsanleitung durchführen (3 bis 6). Wie gesagt, wirklich wichtig ist das nur, wenn man in JPEG fotografiert. Wenn man in RAW fotografiert, dann stellt man die Farbtemperatur im RAW-Konverter ein. Üblicherweise als ersten Schritt in der Bearbeitung des Bildes.

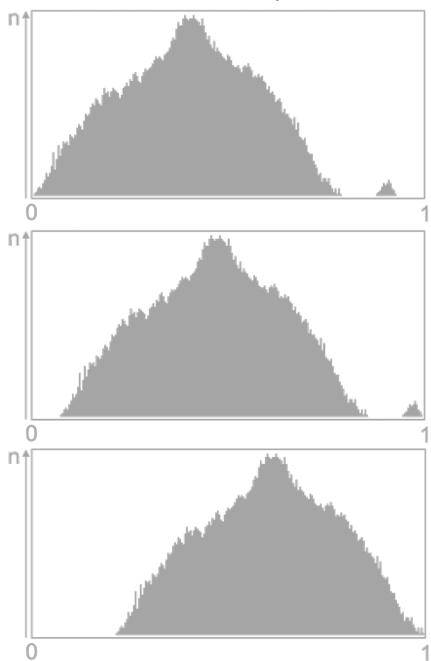
* In modernen Kameras gibt es nicht nur ganze, sondern auch halbe oder Drittelstufen
© Manfred Moormann, Wien, 2021

Wir definieren „passendes“ Belichten als optisch gewünschtes (gefälliges) Belichten und „smartes“ Belichten als Belichten, dass die Möglichkeiten des Sensors optimal ausnutzt. Beim „passenden“ Belichten sollen zB. schwarze Bereiche schwarz erscheinen und weiße Bereiche auch weiß.



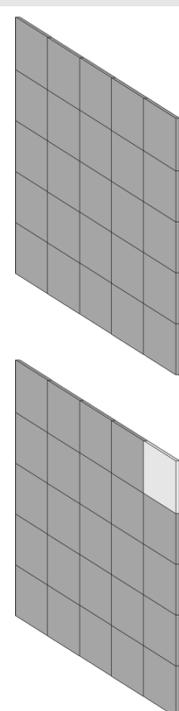
Das kann man mit dem Belichtungsdreieck (Seite 04) ganz gut in den Griff kriegen, v.a. wenn man uA. die Wirkung der Blende auf die Schärfentiefe und die Wirkung der Belichtungszeit auf die Bewegungsunschärfe verstanden hat. Das Bild oben links ist zu hell, es ist „überbelichtet“, das Bild oben rechts ist zu dunkel, es ist „unterbelichtet“. Das Bild in der Mitte ist weder zu hell noch zu dunkel, es ist „passend“. Vielleicht aber wollte der Fotograf bewusst sehr hell belichten, dann ist das was „zu hell“ ist, plötzlich „passend“. Es ist also auch ein Frage des Geschmacks.

Keine Frage des Geschmacks ist das „smarte“ Belichten. Beim „smarten“ Belichten geht es darum den Sensor des Fotoapparats möglichst gut auszunutzen, zB in Hinblick auf das Rauschen (darunter versteht man alle zufällige Fehler, also zB das Dunkel(strom)rauschen (Seite 05), das Schrotrauschen (Seite 09) oder das Digitalisierungsrauschen (Seite 11). Man kann nicht das ganze Rauschen durch „smartes“ Belichten kompensieren, aber zumindest einen Teil davon. Schauen wir uns dazu ein Histogramm an.

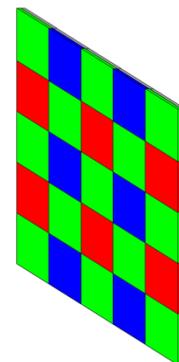


Auf der waagrechten Achse wird der Sensorbereich (0...1) aufgetragen. Dieser Bereich wird bei fast allen Histogrammen 8-bit („JPEG“) unterteilt, also in 256 Werte („Schubladen“, Seite 11) von 0 bis 255. Für jeden dieser Messwerte werden dann senkrecht die Anzahl der Pixel dargestellt, die diesen Messwert haben. Wenn man über alle „Schubladenwerte“ die Messwerte addiert, kommt man auf die Pixelanzahl des Sensors. Wir wissen, dass das Rauschen in den dunklen Bereichen stärker sichtbar ist, als in hellen. Im zweiten Histogramm haben wir daher das Histogrammgebirge etwas nach rechts verschoben (zB. durch eine längere Belichtungszeit) im Vergleich zum ersten Histogramm. Der Abstand des Signals zum (Dunkel-)Rauschen wird dann größer. Im dritten Histogramm haben wir sogar einen Teil des Gebirges aus den Messbereich geschoben, zB weil das vielleicht eine helle Reflexion im Hintergrund ist, die keine Bedeutung für das Bild hat. Wenn man JPEG fotografiert, dann sollte man immer passend belichten. JPEGs lassen für die Nachbearbeitung nicht so viel Spielraum wie RAW-Aufnahmen.

Bei RAW Aufnahmen hat man mehr Spielraum. Daher kann man RAWs (ich würde es empfehlen) smart belichten. Smart belichtete RAWs werden dann im RAW Konverter passend gemacht.



Der Sensor einer Kamera besteht in Wirklichkeit aus vielen einzelnen (analogen) Messgeräten (Pixel oder auch Sensel). Der Sensor links hätte $5 \times 5 = 25$ Pixel. Kameras haben heute Millionen von Pixel, man sagt dann Mega-Pixel, z.B. 20 MPixel. 20 Millionen Pixel sind 800.000 Mal so viel wie die hier gezeigten 25 Pixel.



Da jedes dieser Pixel eigentlich farbenblind ist, werden vor den einzelnen Messgeräten Farbplättchen angebracht, Filter. Die hier gezeigte Anordnung wird Bayer-Filter genannt. Hinter den grünen Plättchen wird nur das grüne Licht gemessen usw. Es gibt doppelt so viele grüne Filter, wie rote und blaue Filter (physiologisch!).

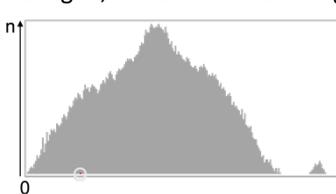


Wie jedes analoge Messgerät hat auch so ein Pixel einen Minimal- und einen Maximalwert, den es messen kann. Theoretisch wäre unter dem Minimalwert alles tief-schwarz und über dem Maximalwert alles nur noch „gleichend“ weiß.

Praktisch stimmt das aber nur beim Maximalwert. Beim Minimalwert (dunkel-) rauscht jeder Sensor. D.h., auch wenn absolut kein Licht am Pixel ankommt, misst der Sensor etwas. Dieser zufälliger Wert ist das Rauschen. Je wärmer ein Sensor ist (egal wodurch), desto stärker rauscht so ein Pixel. Das Rauschen äußert sich durch zufällige Helligkeitsfehler. Weil davor ein Bayerfilter geschaltet ist, ergeben sich damit auch zwangsläufig Farbfehler.



Je nach am Pixel ankommender Lichtmenge wird der Messwert größer sein oder kleiner. Den Bereich vom Minimalwert 0 (begrenzt durch das Rauschen) bis zum Maximalwert 1 nennt man Dynamikumfang. Hätten wir nur ein einziges Pixel, dann könnten wir mit Blende und Belichtungszeit schön einstellen, wo der Messwert liegen soll. Wir würden den Wert dann möglichst knapp beim Maximum rechts hinlegen, das unvermeidliche (Dunkel-)Rauschen hätte dann die kleinste relative Auswirkung.

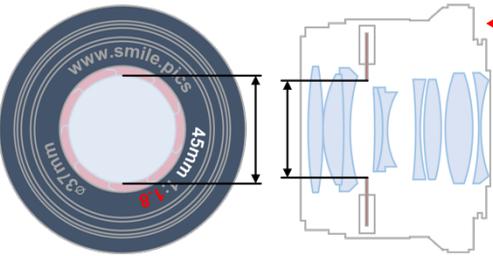


Praktisch hat man aber nicht nur einen Messwert, sondern so viele, wie der Sensor Pixel hat. Das Histogramm zeigt pro Helligkeitswert (horizontale Achse) an, wieviel Pixel genau diesen Wert haben (senkrechte Achse). Man kann also mit Blende und Belichtungszeit nur das „ganze Gebirge“ von Werten verschieben. Manchmal ist der Dynamikumfang nicht groß genug, alle Werte darin abzubilden.

Jedenfalls kann man daraus schon ableiten, dass es v.a. in den dunklen Bereichen eines Fotos rauscht. Anders, als man oft liest, ist jedenfalls die Sensorgröße (z.B. Kleinbild) nicht entscheidend für das Rauschen. Wichtiger ist da schon die Pixelgröße, d.h. bei gleicher Sensorgröße rauscht jene Kamera weniger, die weniger Pixel hat. Bei kleineren Pixel, wirken sich die statistischen Fehler stärker aus. Das Rauschen bei höhere ISO-Werten entsteht durch die Verstärkung der Fehler aus Lichtmangel.

Das starke Rauschen am rechten Bild tritt auf, weil weniger Licht als am linken Bild ankommt. Mehr ISO bedeutet nicht „mehr Licht“, sondern mehr Verstärkung des Signals (auch des Rauschens). Nur mit A und T wird wirklich die Lichtmenge eingestellt.





Die Blende (meistens eine Irisblende aus mehreren Lamellen) ist regelbar und bildet je nach Einstellung ein fast kreisförmiges Loch, durch das Licht durch das Objektiv zum Sensor kommt. Angegeben wird die Blendenöffnung immer als Bruchteil der Brennweite. Am Objektiv ist meistens die Brennweite und die größte Blendenöffnung aufgedruckt. Hier z.B. **45mm** (Brennweite) und **1:1.8** (größte Blendenöffnung).

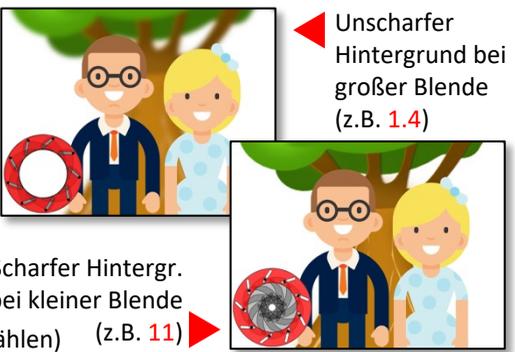
Diese größte Blendenöffnung, also 45mm / 1.8 = 25mm ist allerdings nicht die Abmessung des Lochs in der Blende (oben rechts im Schnittbild dargestellt), sondern der Durchmesser, denn man sieht, wenn man von vorne in das Objektiv hineinsieht (oben links). Diese **Apertur** ist der mechanische Durchmesser der Blendenöffnung vergrößert um die Lupenwirkung der vorderen Linsenelemente.

Wenn die Apertur bei einem Objektiv größerer Brennweite bei gleichem Blendenwert größer ist, wieso wird das dann im Belichtungsdreieck (Seite 04) nicht berücksichtigt?



Ein Objektiv mit 2-facher Brennweite bildet einen Kreis mit halbem Durchmesser ab im Vergleich zur 1-fachen Brennweite (1/4 der Fläche*). Diese Fläche reflektiert z.B. das Sonnenlicht zum Sensor. Andererseits ist der Durchmesser der Apertur bei 2-facher Brennweite 2 x so groß wie die Apertur bei 1-facher Brennweite (4-fache Fläche*). Die beiden Effekte heben einander auf. Die **Brennweite spielt daher im Belichtungsdreieck keine Rolle**, sie „kürzt“ sich weg.

Beim Belichtungsdreieck auf Seite 04 steht, dass bei großer Blende der Hintergrund unscharf ist und bei kleiner Blende scharf. Die Blende beeinflusst aber nicht nur die Schärfentiefe, sondern auch wie scharf ein Objektiv abbildet. Dabei gibt es Unterschiede, ob man in der Bildmitte misst, oder am Bildrand. Es gibt sogenannte MTF (Modulation Transfer Function) Diagramme, wo man die Schärfenverläufe abhängig von der Blende ablesen kann. Meistens gilt, dass Objektive bei voller Blendenöffnung nicht am schärfsten sind. Durch Abblenden (kleinere Blende wählen) (z.B. 11) nimmt die Schärfe zunächst zu, bis sie ein Maximum hat, um danach abzusinken. Das ist ein Effekt der Beugung. Es gibt diese Effekte, wie sehr man sie (be)merkt, sollte jeder selbst ausprobieren, zB. durch Aufnahmen mit den verschiedenen Blendenwerten und anschließender Beurteilung der Bilder.

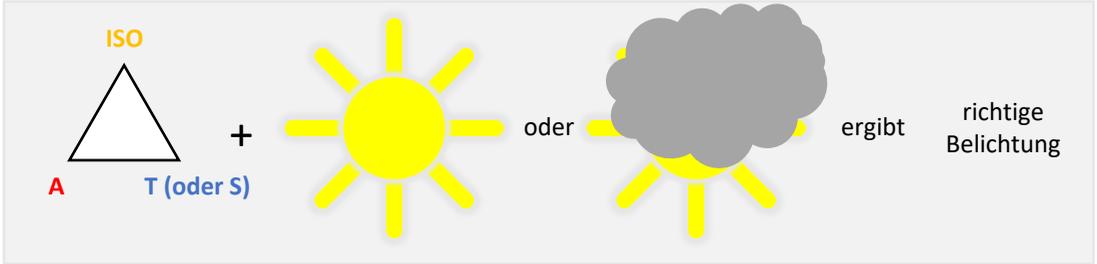


Unschärfer Hintergrund bei großer Blende (z.B. 1.4)

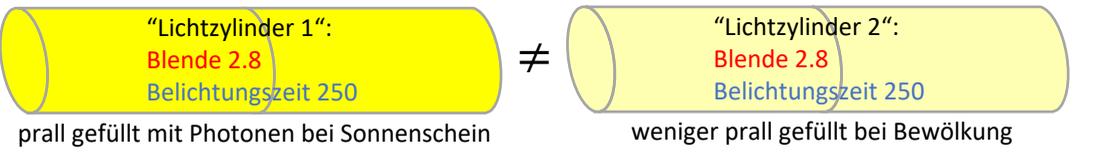
Scharfer Hintergr. bei kleiner Blende (z.B. 11)



* In der Flächenformel für den Kreis geht der Durchmesser quadratisch ein. Aus 2 bzw. 1/2 wird dann 4 bzw. 1/4



Das Belichtungsdreieck auf Seite 03 ist zwar richtig (speziell, wenn man versteht, dass nur Blende und Belichtungszeit die Lichtmenge regeln, der ISO-Wert nur Messergebnisse, inklusive Fehler, verstärkt). Trotzdem fehlt in der Gleichung für korrekte Belichtung noch ein Parameter: das Licht (egal ob natürlich oder künstlich hinzugefügt). Man kann sich das so vorstellen, dass sich bei mehr Licht mehr Lichtteilchen in den „Lichtzylindern“ aufhalten.



Wenn man geschickt darin ist, die vorhandene Helligkeit zu schätzen, dann kann man mit dem „Papierbelichtungsmesser“ (<https://smile.pics/papierbelichtungsmesser>) sehr gute Ergebnisse erzielen. Man muss das Licht aber nicht schätzen, man kann es auch messen. Dafür gibt es prinzipiell zwei unterschiedliche Arten der Messung: Lichtmessung und Objektmessung

Lichtmessung

Hier misst man mit einem externen Belichtungsmesser das tatsächlich vorhandene Licht (Messung hinter der weißen Kalotte*). Eine Kamera kann das nicht. Eine Kamera kann nur messen, was vom Objekt in ihre Richtung reflektiert wird.

Objektmessung

Eine Kamera kann nur messen, was zu ihr vom Objekt reflektiert wird. Sie nimmt an, dass dieses Objekt mittelgrau ist, mittelstark Licht reflektiert. Ist es das nicht (das ist es selten!) muss man als Fotograf die Messung interpretieren.



Auch wenn die Messmethoden von Kameras sehr gut sind, wissen sie nicht, ob sie ein helles oder dunkles Objekt messen. Daher ist die Lichtmessung zwar nicht komfortabler, aber besser als die Objektmessung. Es gibt jedenfalls Situationen wo sich die Lichtmessung auszahlt.

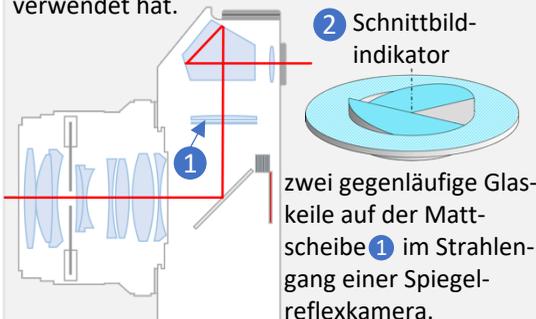
Bei der Objektmessung kann man bei den meisten Fotoapparaten einstellen wie groß der Bereich sein soll, der gemessen wird. Spotmessung berücksichtigt nur einen kleinen Teil der gesamten Fläche, die im Sucher aufscheint, andere Messmethoden einen größeren Teil

* Eine Kalotte ist ein Kugelabschnitt, diese weiße Kuppel oben in der Mitte

Das automatische Scharfstellen durch die Kamera nennt man Autofokus (AF). Im Wesentlichen gibt es dazu zwei unterschiedliche Technologien: Phasendifferenz-AF und Kontrast-AF.

Phasendifferenz-AF

Der PDAF ist eine Weiterentwicklung der Schnittbildindikatoren, die man schon beim Scharfstellen in analogen Spiegelreflex-Kameras verwendet hat.



Scharf ist das Bild dann, wenn die Bildteile oben und unten bündig aneinander anschließen.



Die Drehrichtung des Fokusrings und auch der Drehwinkel ist bei einem derartigen analogen System sehr gut abschätzbar. Für waagrechte Kontrastkanten, musste man die Kamera im Hochformat halten.

Bei Spiegelreflexkameras wurde die digitale Weiterentwicklung dieser Technik am Boden der Kamera verbaut. Waren die Abstände Spiegel zu Mattscheibe und Spiegel zu AF-System nicht exakt gleich, musste der AF feinjustiert werden. Spiegellose Systeme haben heute 1. Kreuzsensoren (funktionieren waag- und senkrecht), 2. sehr viele davon und befinden sich 3. unmittelbar am Sensor. Sie müssen daher nicht feinjustiert werden.

Den AF Modus wählt man üblicherweise nicht direkt, das macht die Kamera. Verwendet man die „Lupe“ wird aber Kontrast-AF verwendet, usw. Ob der AF nur einmalig misst oder kontinuierlich, kann man einstellen.

Kontrast-AF

Der Kontrast-AF funktioniert prinzipiell anders als der PDAF. Beim Kontrast-AF wird der Kontrast des am Sensor entstehenden Bild ausgewertet, danach der Fokus verändert (die Richtung ist zunächst unklar) und je nach Ergebnis der zweiten Auswertung in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung fokussiert. Das passiert so lange, bis ein Maximum erreicht wird.

Die Fokussierichtung ist zunächst unklar.



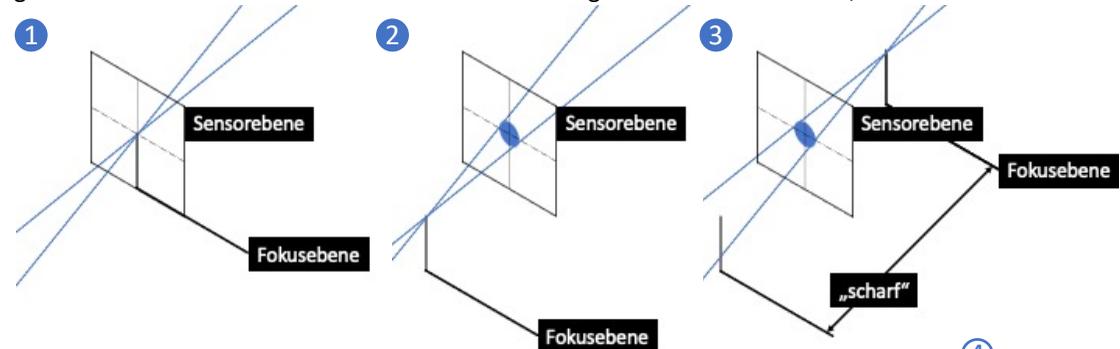
Abhängig vom Ergebnis wird die Richtung beibehalten oder gewechselt.

Vorteile/Nachteile der verschiedenen AFs

Fast alle modernen digitale spiegellose Kameras haben einen Kontrast-AF. Die meisten haben auch einen PDAF oder eine darauf beruhende Entwicklung. Sowohl Kontrast-AF als auch Phasendifferenz-AF haben Vorteile und Nachteile. Je nach Autofokus-Einstellung versuchen viele Kamerahersteller in einem Hybridmodus die Vorteile der beiden Systeme zu vereinen.

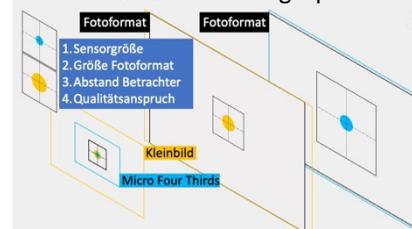
Phasen-AF	Kontrast-AF
+ schneller	+ genauer
+ kann Motive verfolgen	+ auch bei schlechtem Licht gut
+ prädiktiver Fokus, kann Position „vorhersagen“	+ kann Strukturen erkennen
- benötigt genug Licht	+ kann auf ganzer Sensorfläche messen
- Messung nur dort, wo Messfelder sind	- „pumpt“, fokussiert vor/zurück bis Maxim.

Die Schärfentiefe ist prinzipiell eine Längenangabe, man gibt sie zB. in Meter an (daher nicht: Tiefenschärfe). Wie groß ist der Bereich, den man sozusagen in die 3. Dimension des 2-dimensionalen Fotos, scharf abbilden kann? Wenn man am Objektiv die Entfernung zum Objekt einstellt (z.B. per Autofokus) gibt es einen Bereich vor und hinter dieser Entfernung der ebenfalls scharf ist, die Schärfentiefe.



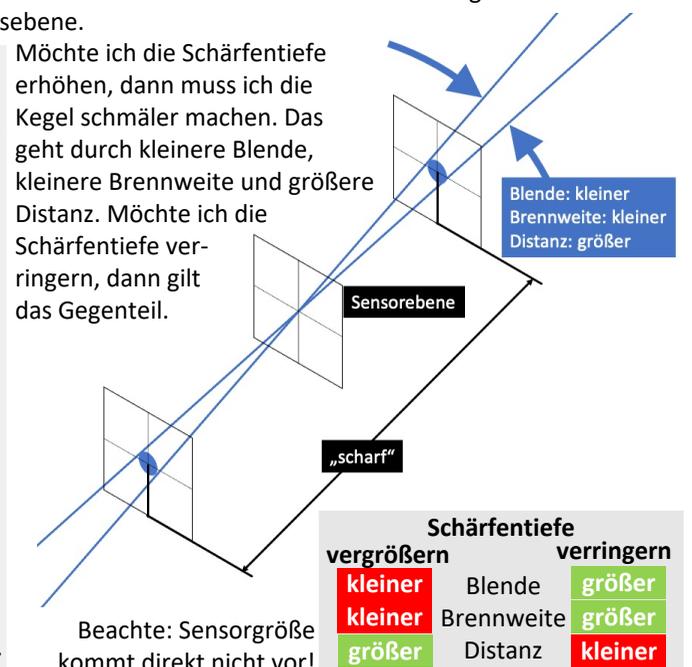
1 Wenn die Fokusebene mit der Sensorebene übereinstimmt, wird am Sensor ein Punkt auch als Punkt abgebildet. Vor der Sensorebene und hinter der Sensorebene laufen 2 Kegel auf diesen Punkt zu. Diese Kegel sind ein Ergebnis der optischen Systeme im Fotoapparat. 2 Wenn die Fokusebene vor der Sensorebene liegt entsteht ein Kreis (als Schnitt der Sensorebene mit dem Kegel). Erst ab einer gewissen Distanz wird dieser Kreis nicht mehr als Punkt wahrgenommen. 4 Der größte noch als Punkt wahrgenommener Kreis wird als größter noch akzeptabler Zerstreuungskreis bezeichnet. 3 Wenn die Fokusebene hinter der Sensorebene liegt, gilt das Gleiche wie unter 2. Der als scharf wahrgenommene Bereich zwischen dem vorderen und hinteren akzeptablen Zerstreuungskreis bildet den Bereich der Schärfentiefe. In diesem Distanzbereich wird alles als scharf wahrgenommen. „Wirklich“ scharf ist es nur in der Fokusebene.

Der Zerstreuungskreis ist als Wert auch in den Exif Daten* gespeichert.



In den Exifs wird er nur durch die Sensorgröße bestimmt (das was vom kleineren Sensor erfasst wird, muss mehr vergrößert werden, um gleiche Größe zu haben, wie das v. größeren Sensor → Zerstreuungskreis kleinerer Sensoren ist kleiner). Praktisch ist der Zerstreuungskreis aber sehr subjektiv: Druckgröße, Betrachterabstand, Qualitätsanspruch,... spielen auch mit.

Möchte ich die Schärfentiefe erhöhen, dann muss ich die Kegel schmaler machen. Das geht durch kleinere Blende, kleinere Brennweite und größere Distanz. Möchte ich die Schärfentiefe verringern, dann gilt das Gegenteil.

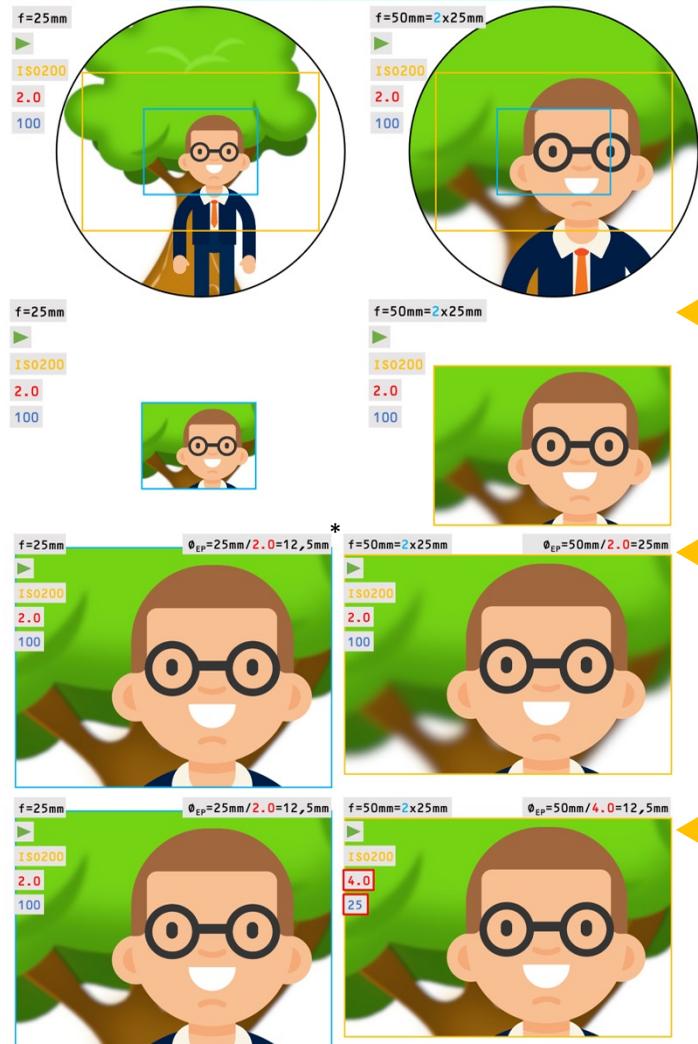


Beachte: Sensorgröße kommt direkt nicht vor!

„Einem Objektiv ist die Sensorgröße egal“

Stellen wir uns einen Fotoapparat vor, bei dem ich nicht nur das Objektiv wechseln kann, sondern auch den Sensor. Die Sensoren können sich zB. durch Größe (Breite und Höhe) und Format (Verhältnis der Seitenlängen von Breite und Höhe) unterscheiden, die Objektive durch ihre Brennweiten.

	mm	mm		mm	Crop	mm ²	Apel
Kleinbild (35mm) Vollformat	36	24	3:2	43,27	1	864	100%
(Micro) Four Thirds	17,3	12,98	4:3	21,63	2	225	26%



Wir nehmen zwei Sensoren, deren Diagonalen sich um den Faktor 2 unterscheiden und 2 Objektive deren Brennweiten sich ebenfalls um den Faktor 2 unterscheiden. Den kleinen Sensor markieren wir blau den großen Sensor dunkel-gelb. Das kleinere Objektiv haben wir links, das größere Objektiv rechts. Die Werte des Belichtungsdreiecks lassen wir bei beiden Fotos gleich. Jetzt wählen wir für das Objektiv mit der kürzeren Brennweite den kleinen (blauen) Sensor, für die längere Brennweite den größeren (gelben) Sensor. Die Bildausschnitte schauen einander jedenfalls recht ähnlich, ich würde sagen, sie sind fast gleich (bis auf das Format).

Besser sichtbar wird der Unterschied wenn ich die beiden Fotos vergrößere. Offensichtlich gibt es Unterschiede bei der Schärfentiefe. Das ist auch zu erwarten, weil die Schärfentiefe u.a. durch die längere Brennweite geringer wird (siehe Seite 07), das sieht man rechts gut. Möchte ich auf beiden Seiten die gleiche Schärfentiefe erreichen, dann muss ich am gelben (Kleinbild) Sensor 2 Blendenstufen stärker abblenden als am blauen (Micro Four Thirds) Sensor. Um das machen zu können, ohne die Belichtung zu verändern, muss ich Belichtungszeit ebenfalls um 2 Belichtungsstufen

verändern. D.h. ich mache gleichzeitig die Durchmesser kleiner und die Belichtungszeit länger, wir haben das „Modell“ des Lichtzylinders auf Seite 07 bereits kennen gelernt. Diese längere Belichtungszeit kann bei größerer Brennweite auch zum Verwackeln führen. Statt der Belichtungszeit kann ich natürlich auch die ISO erhöhen. Das führt allerdings dazu (siehe Seite 05), dass das Bild mehr rauscht. Da Kleinbild-Sensorpixel in der Regel größer sind als MFT-Pixel, rauschen bei gleichem ISO-Wert Kleinbild Sensoren allerdings auch weniger. Masse, Abmaße, Preis usw. sind weitere Themen bei der Auswahl eines Kamerasystems.

Bei den Beispielen für Fotos unterschiedlicher Brennweiten auf Seite 12 haben wir den Standort nicht verändert. Jetzt machen wir genau das. Wir verändern sowohl Brennweite als auch die Position des Fotografen. Die fotografierte Person bleibt immer an der gleichen Stelle stehen.



Besonders 2 Dinge sind auffällig:

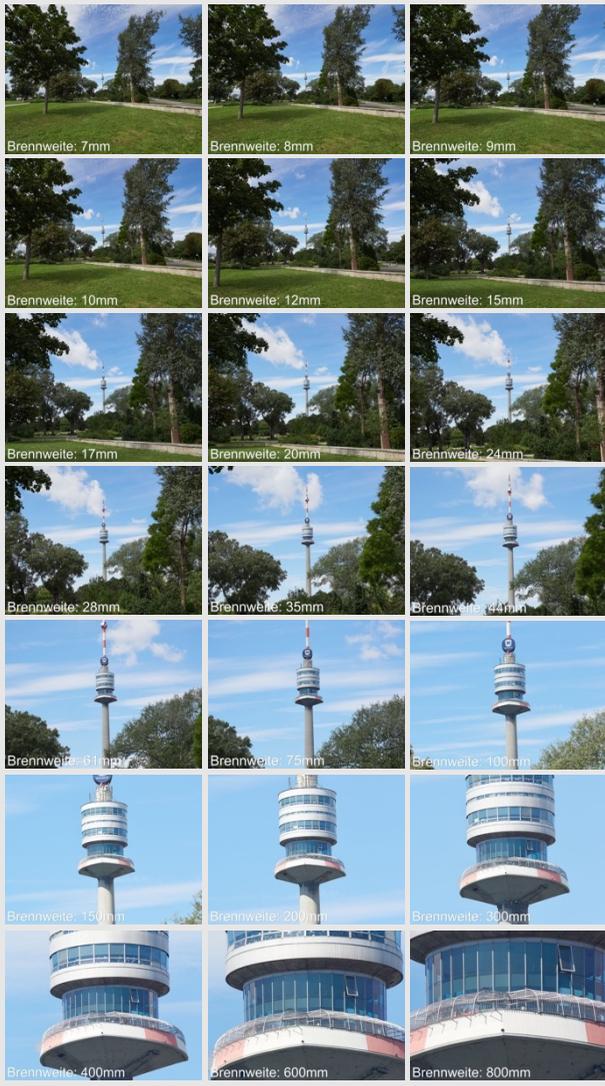
1. Die Veränderung der Wirkung des Gesichts. Je länger die gewählte Brennweite, desto breiter erscheint das Gesicht. Das sollte man bei Portraitfotos berücksichtigen, man kann damit Gesichter breiter oder schmaler wirken lassen.
2. Die Veränderung der Wirkung des Hintergrunds. Während beim Bild oben links der Baumstamm durch das Gesicht verdeckt wird, ist beim Bild unten rechts der Stamm deutlich breiter als das Gesicht. Zusätzlich erscheint der Hintergrund mit steigender Brennweite unschärfer (siehe auch Seite 07)

„Einem Objektiv ist die Sensorgröße egal“

Wie bei den Überlegungen zur „Äquivalenz“ (Seite 08) erwähnt, ist dem Objektiv egal, wie groß der Sensor ist, der das eintreffende Licht auffängt. Das was der Sensor auffängt, fängt er auf, der Rest geht halt am Sensor vorbei (siehe Bild links, zwei unterschiedliche Sensoren angedeutet durch das blaue bzw. dunkelgelbe Rechteck). Das was der zB. blaue Sensor nicht auffängt, geht für eine Kamera mit diesem Sensor eben verloren. Man kann sich die auffangbaren Bildwinkel für Sensordiagonale, -breite und -höhe in Abhängigkeit von Brennweite und Sensorgröße ausrechnen.



Spannender als die Winkel sind Beispiele (hier auf MFT)

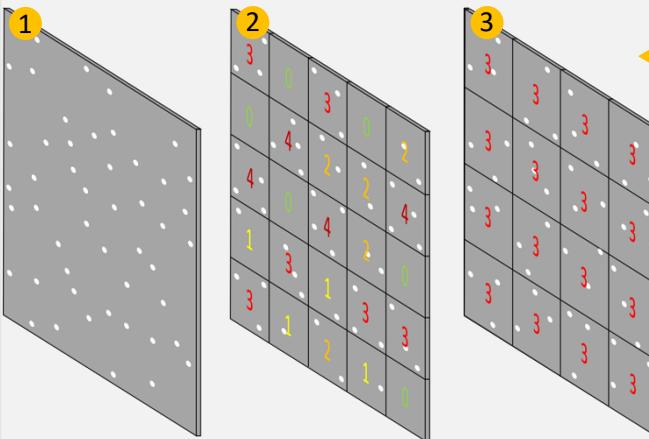


Sensor	Micro Four Thirds			Kleinbild		
	Breite	Höhe	Diag.	Breite	Höhe	Diag.
mm	17.31	12.98	21.64	36.00	24.00	43.27
f	max. Bildwinkel pro Brennweite f					
mm	Breite	Höhe	Diag.	Breite	Höhe	Diag.
4	130.39	116.71	139.42	154.94	143.13	159.05
7	102.07	85.67	114.19	137.50	119.49	144.14
8	94.50	78.10	107.03	132.08	112.62	139.41
12	71.60	56.81	84.07	112.62	90.00	121.97
14	63.45	49.74	75.39	104.25	81.20	114.18
17	53.96	41.79	64.94	93.27	70.44	103.68
20	46.80	35.96	56.82	83.97	61.93	94.49
25	38.19	29.11	46.80	71.51	51.28	81.74
30	32.19	24.41	39.66	61.93	43.60	71.59
35	27.78	21.01	34.35	54.43	37.85	63.44
40	24.42	18.43	30.27	48.46	33.40	56.81
45	21.77	16.41	27.03	43.60	29.86	51.35
50	19.64	14.79	24.42	39.60	26.99	46.79
60	16.42	12.35	20.44	33.40	22.62	39.65
75	13.17	9.89	16.42	26.99	18.18	32.18
100	9.89	7.43	12.35	20.41	13.69	24.41
150	6.60	4.95	8.25	13.69	9.15	16.41
200	4.96	3.72	6.19	10.29	6.87	12.35
250	3.97	2.97	4.96	8.24	5.50	9.89
300	3.31	2.48	4.13	6.87	4.58	8.25
350	2.83	2.12	3.54	5.89	3.93	7.07
400	2.48	1.86	3.10	5.15	3.44	6.19
420	2.36	1.77	2.95	4.91	3.27	5.90
500	1.98	1.49	2.48	4.12	2.75	4.95
560	1.77	1.33	2.21	3.68	2.46	4.42
600	1.65	1.24	2.07	3.44	2.29	4.13
800	1.24	0.93	1.55	2.58	1.72	3.10
1000	0.99	0.74	1.24	2.06	1.38	2.48

Da die Sensordiagonale eines (Micro) Four Thirds Sensors ziemlich genau halb so lang ist, wie die eines Kleinbild-Sensors, ergibt sich für den Diagonalwinkel eines Objektivs mit Brennweite f am MFT Sensor der fast gleiche Winkel wie für die Brennweite 2 * f am Kleinbildsensor. Trotzdem ist die Aussage falsch, dass sich am MFT-Sensor die

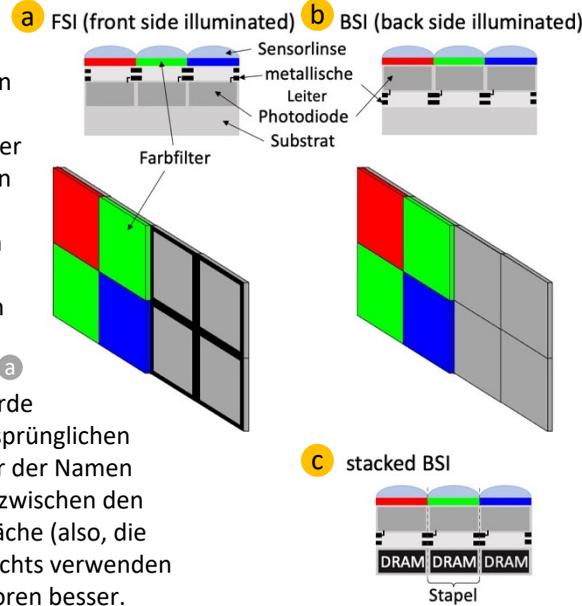
Brennweite „verdoppelt“ (Schärfentiefe, Belichtungszeiten die zum Verwackeln führen, etc. Seite 08)

Sowohl unter „Sensoren und Rauschen“ (Seite 05) als auch unter „Äquivalenz“ (Seite 08) steht, dass die Größe der Pixel eines Sensors einen Einfluss auf das Rauschen hat, im Unterschied zur Größe des Sensors. Wieso spielt die Menge der Pixel pro Sensor und damit Größe der Pixel eine Rolle?



Wir sehen bei 1 die Sensorfläche und (als weiße Punkte) die auf dem Sensor auftreffenden Photonen (Lichtteilchen). Die Photonen treffen zufällig an einer bestimmten Stelle des Sensor auf und erzeugen dort ein analoges elektrisches Signal. Je mehr Photonen auftreffen umso stärker ist dieses Signal. Bei 2 sehen wir einen Sensor mit relativ kleinen Pixeln. Zählen wir die auftreffenden Photonen pro Pixel, dann sehen wir, dass in manchen Pixeln gar kein Photon auftrifft, in anderen 1, 2, 3 oder sogar 4 auftreffen.

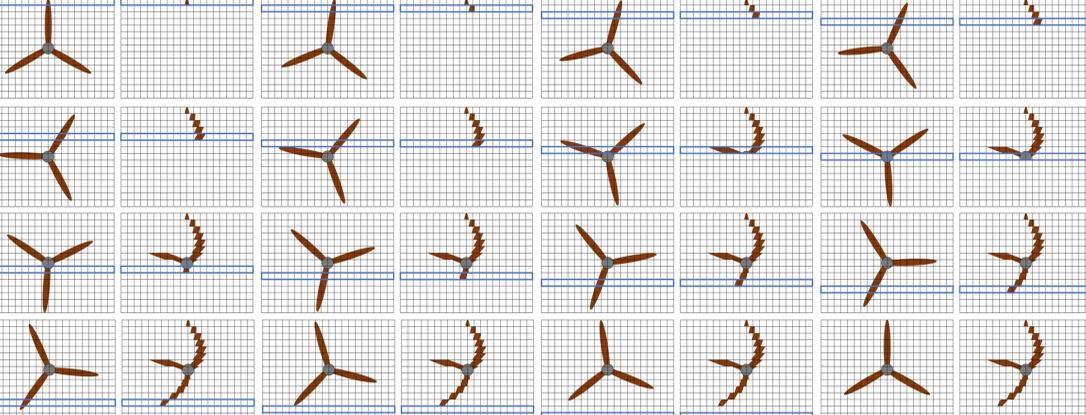
Bei 3 sehen wir einen Sensor mit weniger und damit größeren Pixeln im Vergleich zu 2*. Die Anzahl der auftreffenden Photonen pro Pixel ist immer gleich, 3. Das ist ein statistischer Effekt. Je kleiner die Pixel sind, umso stärker spielt der zufällige Auftreffpunkt der Photonen eine Rolle („Schrottrauschen“). Bei Sensoren spielt aber nicht nur die Pixelgröße eine Rolle, sondern zB. auch wie groß der Anteil der Fläche eines Sensor ist, der messen kann. Die oben fein eingezeichneten Abgrenzungen eines Pixels zum nächsten, können je nach Bauart des Sensors relativ breit sein. Schauen wir uns drei verschiedene Sensorbauarten eines CMOS Sensors an.



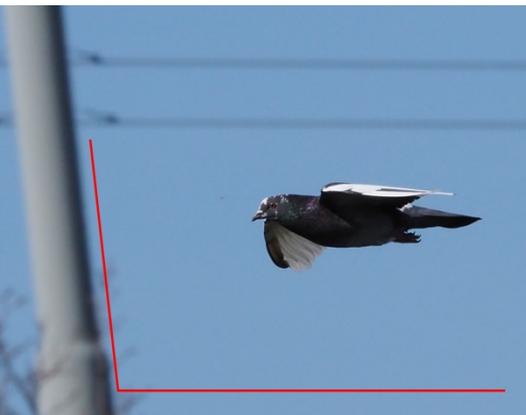
FSI (front side illuminated) wird heute FSI genannt. Wir sehen den Bayerfilter vor dem Halbleiter. Auf den Bayerfilter-Plättchen sind noch Sammellinsen aufgebracht**. Die im Sensor durch das auftreffende Licht ausgelösten elektrischen Signale müssen zur Verarbeitung weitergeleitet werden. Diese Leitungen nehmen relativ viel Platz ein, die Begrenzung eines Pixels wird dadurch recht breit. Wir sehen das im Bild a unten. Bei den moderneren BSI Sensoren b wurde die Anordnung umgedreht. Bezogen auf den ursprünglichen Aufbau werden sie von hinten beleuchtet, daher der Namen backside illuminated. Wir sehen, dass die Stege zwischen den Pixeln deutlich kleiner sind, dh. dass die Nettofläche (also, die Fläche, die man zum messen des einfallenden Lichts verwenden kann) daher größer wird. Daher sind diese Sensoren besser. Ein Spezialfall eines BSI ist der unter c gezeigte „gestackte“ BSI. Hier werden unter dem Messflächen der Pixel sehr schnelle Speicherbausteine gestapelt. Von diesen Speichern werden die Signalwerte dann zur Weiterverarbeitung abgeholt. Man macht das v.a. aus Fertigungsgründen (Geschwindigkeitsvorteile nimmt man mit, Stichwort: Rolling Shutter Effekt). Alles sehr vereinfacht dargestellt.

* Auf größeren Pixeln kommt auch einfach mehr Licht an, d.h. größerer Signal zu Rausch Abstand
** In Wirklichkeit sind gefärbte Microlinsen die Plättchen

Der **Rolling Shutter Effekt** ist ein Abbildungs-Fehler, der bei rein elektronischer Auslesung von Bildsensoren entsteht (also ohne Verwendung des mechanischen Schlitzverschlusses). Die zeilenweise Auslesegeschwindigkeit ist hier nicht hoch genug, um schnelle Bewegungen korrekt abzubilden. Unten am Beispiel eines Propellers: Jeweils links der drehende Propeller und rechts das Ergebnis das dadurch entsteht, weil die entsprechenden Zeilen (blau markiert) nur zu langsam ausgelesen werden können.



Dieser Effekt tritt in der Praxis leider bei elektronischem Verschluss häufig auf. Hier zwei Beispiele. Das eine bei einer Aufnahme eines Vogels im Flug. Der elektrische Mast im Hintergrund fällt unnatürlich aus dem rechten Winkel. Das andere beim Flügelschlag einer Wespe. Die Flügel sind deformiert.



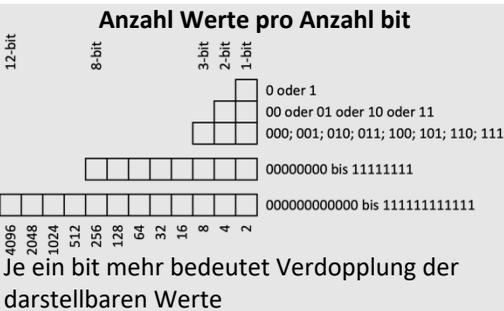
Projektion Laserbeamer aufgenommen m. elektr. Verschluss im Hochformat



...im Querformat

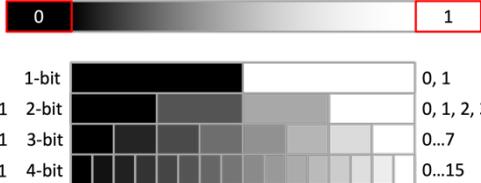
Banding (streifenweise oder bandartige Farbfehler) kann auch andere Ursachen haben, aber die Verwendung von elektronischem Verschluss bei zB. Laserbeamer-Projektionen ist eine typische Ursache (das menschliche Auge ist zu träge um die Farbänderungen zu merken, bzw. das Hirn zu schnell beim Korrigieren). Schön hier links zu sehen sind die unterschiedlichen Streifenrichtungen je nachdem, ob im Hochformat (Auslesung von links nach rechts) oder im Querformat (Auslesung von oben nach unten) fotografiert wurde – alles Ausschritte.

Wir haben uns sehr an unser Zahlensystem mit der Basis 10 gewöhnt. Es besteht aus 10 Ziffern von 0 bis 9 und basiert auf einem Stellenwertsystem (es ist für die Zahl nicht egal, an welcher Stelle eine Ziffer steht). Jeder von uns weiß, die Zahl 4711 meint: 4 mal Tausend plus 7 mal Hundert plus 1 mal Zehn plus 1 mal Eins. Das duale Zahlensystem besteht aus nur 2 Ziffern und ebenfalls einem Stellenwertsystem. Die Anzahl der Stellenwerte gibt das bit an. 8 bit heißt, ich habe 8 Stellenwerte zur Verfügung. Ganz rechts der niederste Stellenwert, ganz links der höchste. Das ist wie bei unserem 10er (oder dekadischen) System, wo auch rechts der niederste Stellenwert ist. Dass wir sonst von links nach rechts schreiben fällt uns nicht weiter auf, egal wir verwenden ja auch (indisch-)arabische Ziffern.



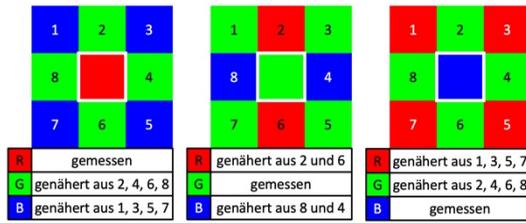
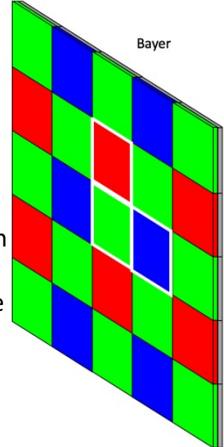
Je ein bit mehr bedeutet Verdopplung der darstellbaren Werte

Zurück zu den analogen Messwerten (proportional z. Anzahl auftreffender Lichtteilchen) der Pixel (Seite 05)



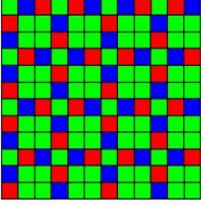
Die Messwerte von 0 bis 1 werden entsprechend der zur Verfügung stehenden bit-Anzahl aufgeteilt. Der prinzipiell kontinuierliche analoge Messwert wird in „eine Schublade gesteckt“. Wenn wir 8-bit zur Verfügung haben, haben wir 256 verschiedene „Schubladen“-Werte (von 0...255), bei 12-bit 4096 und bei 14-bit 16384 Werte. Je mehr bit, desto mehr „Schubladen“ & desto weniger Digitalisierungsfehler.

Wir wissen, dass Pixel farbenblind sind (zumindest unsere). Daher schalten wir ein Set von Farbfiltern vor die Pixel (Seite 05). Wenn ich die Anordnung der Farbplättchen weiß, kann ich pro Pixel einen Farbwert messen und die anderen beiden Farben durch benachbarte Messwerte berechnen. Fast alle Kamerahersteller außer Fuji verwenden Bayer-Anordnung.



Codierung	8-bit	12-bit	14-bit
Wertemenge	2 ⁸ =256	2 ¹² =4096	2 ¹⁴ =16384
Wertebereich	R: 0...255	0...4095	0...16383
	G: 0...255	0...4095	0...16383
	B: 0...255	0...4095	0...16383
Farben (theoretisch)	256 ³ = 16,8 Mio	4096 ³ = 68,7 Mrd	16384 ³ = 4,37 Billionen

Xtrans (Fuji)



Fuji verwendet eine eigene Anordnung der Farbfilter vor den Sensorpixeln

Man kann aus drei (geeigneten) Farben jede beliebige Farbe mischen. Sind die Werte 8-bit codiert, kann man 256 x 256 x 256 = 16.8 Mio Farben erzeugen.

