

Teil 2: Sensoren und Software



01

Sensoren

Charge-coupled Device (CCD):

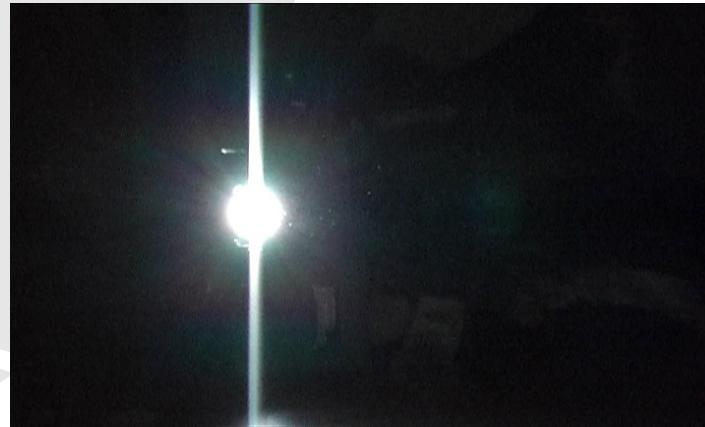
- Jedes Pixel enthält Kondensator, läd sich nach Lichtintensität auf
- Pixel reichen Ladung jeweils an Nachbarpixel weiter
 letztes Pixel benutzt Ladungsverstärker zum Umwandeln in Spannung
 ⇒ Serie an Spannungen
- Bei Digitalkamera: AD-Wandler macht aus Spannungen digitale Werte

Active Pixel Sensor (APS) / Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS):

- Jedes Pixel hat eigenen Verstärker, der Ladung in Spannungssignal umwandelt
- Pixel können einzeln ausgelesen werden

1.2. Vor- und Nachteile

- CMOS/APS früher qualitativ schlechter in Bezug auf Rauschen als CCD, dafür schneller auslesbar, energieeffizienter und einfacher herzustellen
- Mittlerweile quasi nur noch CMOS in Kameras, seit ca. 2020 existieren CMOS-Sensoren, die auch besseres Rauschverhalten als CCDs haben.
- CCDs sind anfälliger für “Blooming”: Ladung überbelichteter Pixel geht auf Nachbarpixel über



Blooming von CCD-Sensor

Genetichazzard, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

1.2. Vor- und Nachteile

- Klassische CMOS haben “rolling shutter”-Problem: Bild wird zeilenweise ausgelesen
- Bei schnellen Bewegungen: Verzerrtes Bild möglich

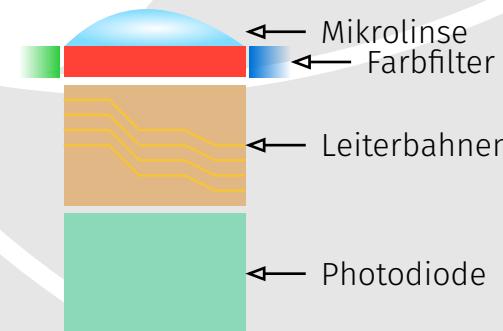
► Animation zu Rolling Shutter Cmglee, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

- Hohe Auslesegeschwindigkeit mitigt das Problem.
- Prinzipiell ist auch Global Shutter (Auslesen des ganzen Sensors auf einmal statt zeilenweise) möglich. Bisher nur bei der Sony α-9 III (oder bei kleinen Sensoren).

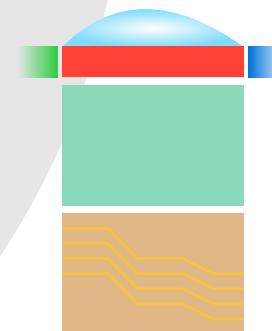
1.2. Vor- und Nachteile

- zusätzliche Elektronik auf Sensor reduziert lichtempfindliche Fläche
- moderne Kameras nutzen “Backside-Illuminated” (BSI) Sensoren
- weitere Verbesserung: “Stacked” Sensoren: mehrere Schaltungslayer für schnellere Auslesegeschwindigkeit

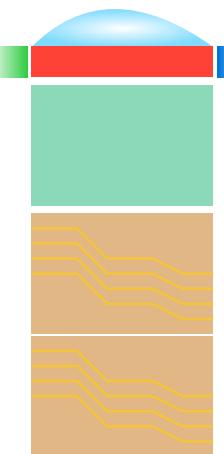
Klassischer CMOS



BSI-Sensor

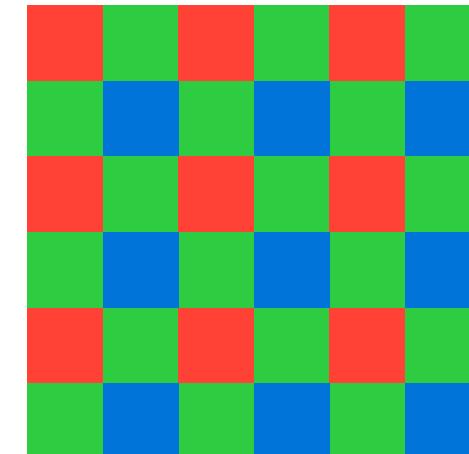


Stacked Sensor



1.3. Farbige Pixel

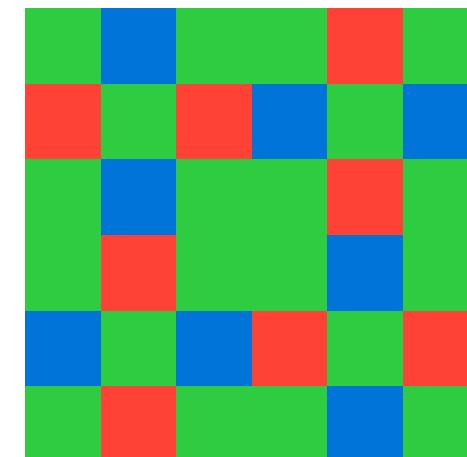
- Photodioden messen erst mal nur Helligkeit
- Farbfilter vor Pixel, um nur eine Wellenlänge zu messen
- Menschliche Wahrnehmung stark von grünen Wellenlängen beeinflusst
(72 % von Helligkeit und Kontrast bei Grautönen; Rot 21%, Blau 7%)
- Verrechnung zu Pixeln über Demosaicing-Algorithmen
- Übliches Muster: Bayer-Matrix



- doppelt so viel Grün wie Rot und Blau
- Grün in der Mitte des Farbspektrums: üblicherweise höchste Schärfe in Objektiven

1.3. Farbige Pixel

- Photodioden messen erst mal nur Helligkeit
- Farbfilter vor Pixel, um nur eine Wellenlänge zu messen
- Menschliche Wahrnehmung stark von grünen Wellenlängen beeinflusst
(72 % von Helligkeit und Kontrast bei Grautönen; Rot 21%, Blau 7%)
- Verrechnung zu Pixeln über Demosaicing-Algorithmen
- Fuji-Alternative: X-Trans-Muster
 - ▶ soll Moiré reduzieren
 - ▶ 2:5:2 statt 1:2:1 Verhältnis der Farben (56% grün)
 - ▶ jede Farbe in jeder Zeile und Spalte

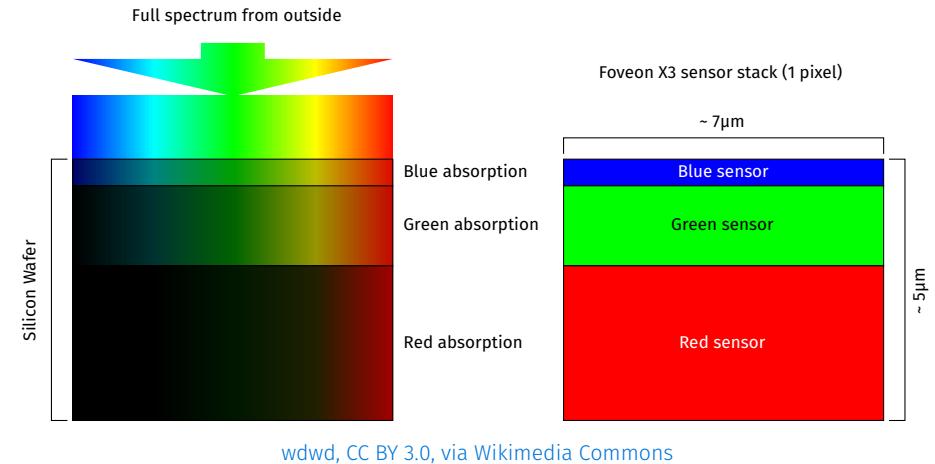


1.3. Farbige Pixel

- Früher verwendete Varianten:
 - ▶ Kodak und Sony hatten zusätzlich “weiße” Pixel (ohne Farbfilter)
 - ▶ Sony DSC-F 828 (2003): Filter mit 2 verschiedenen Grüntönen

1.4. Foveon

- Alternatives Sensordesign mit mehreren Photodioden-Schichten, nur in Sigma-Kameras
 - Tiefere Schicht für größere Wellenlängen
 - Kein Farbmoire, da Farben nicht verschoben zueinander
-
- Dafür geringere Farbgenauigkeit durch Kreuzkontamination (alle Wellenlängen gehen durch alle Schichten)
 - In der Theorie bessere Lichtempfindlichkeit, weil keine Photonen ausgefiltert werden. In der Praxis durch weniger scharfes Ansprechen der Schichten mehr Farbrauschen bei wenig Licht

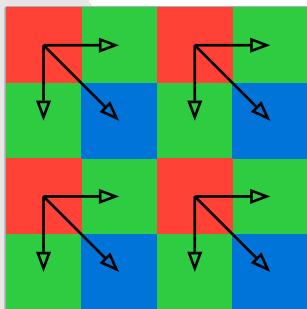


wdwd, CC BY 3.0, via Wikimedia Commons

1.5. Demosaicing

Aus dem Bayer-Muster wollen wir Pixel mit RGB-Farbwerten erhalten. Dafür gibt es verschiedene Algorithmen.

- Ziel: Minimierung von Artefakten (vor allem an Kanten im Bild), Auflösung möglichst gut erhalten
- Triviale Lösung: Nearest-Neighbour-Interpolation

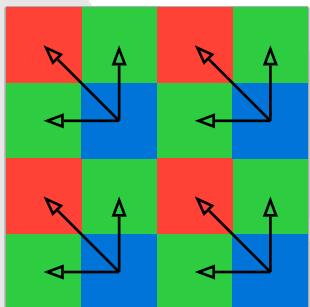


- Schnell, aber schlechte Ergebnisse, vor allem in detailreichen Bereichen und an Kanten

1.5. Demosaicing

Aus dem Bayer-Muster wollen wir Pixel mit RGB-Farbwerten erhalten. Dafür gibt es verschiedene Algorithmen.

- Ziel: Minimierung von Artefakten (vor allem an Kanten im Bild), Auflösung möglichst gut erhalten
- Triviale Lösung: Nearest-Neighbour-Interpolation

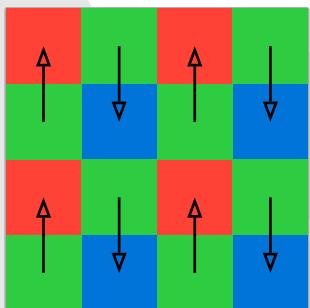


- Schnell, aber schlechte Ergebnisse, vor allem in detailreichen Bereichen und an Kanten

1.5. Demosaicing

Aus dem Bayer-Muster wollen wir Pixel mit RGB-Farbwerten erhalten. Dafür gibt es verschiedene Algorithmen.

- Ziel: Minimierung von Artefakten (vor allem an Kanten im Bild), Auflösung möglichst gut erhalten
- Triviale Lösung: Nearest-Neighbour-Interpolation

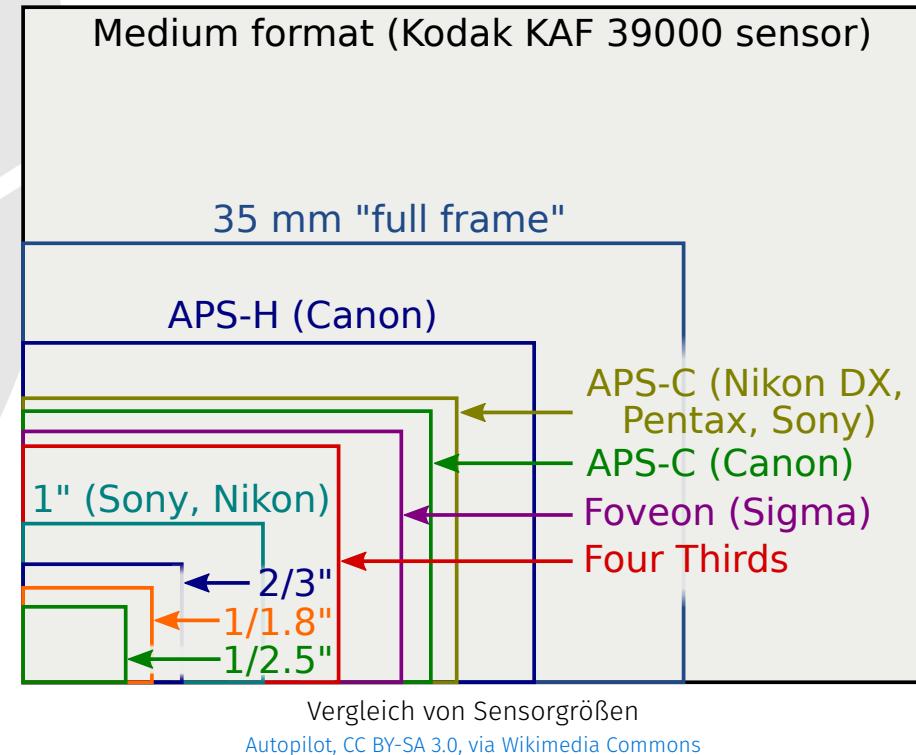


- Schnell, aber schlechte Ergebnisse, vor allem in detailreichen Bereichen und an Kanten

1.6. Sensorgrößen

Auswirkungen der Sensorgröße:

- DoF, Crop-Faktor (siehe Teil 1)
- Pixelgröße bei gleicher Auflösung



Mechanischer Verschluss: Zwei Vorhänge, die den Sensor abdecken (siehe Teil 1).

Elektronischer Verschluss:

Sensor wird nicht abgedeckt, nur resetted, dann ausgelesen.

Vorteile:

- Schnellere Belichtungszeiten und Bildfolgen möglich
- Leise
- kein mechanischer Verschleiß

Nachteile:

- Rolling Shutter-Effekt und Banding stärker ausgeprägt
- Blitzsynchronisation bei vielen Kamerae nur mit mechanischem Verschluss

Beispiel für banding



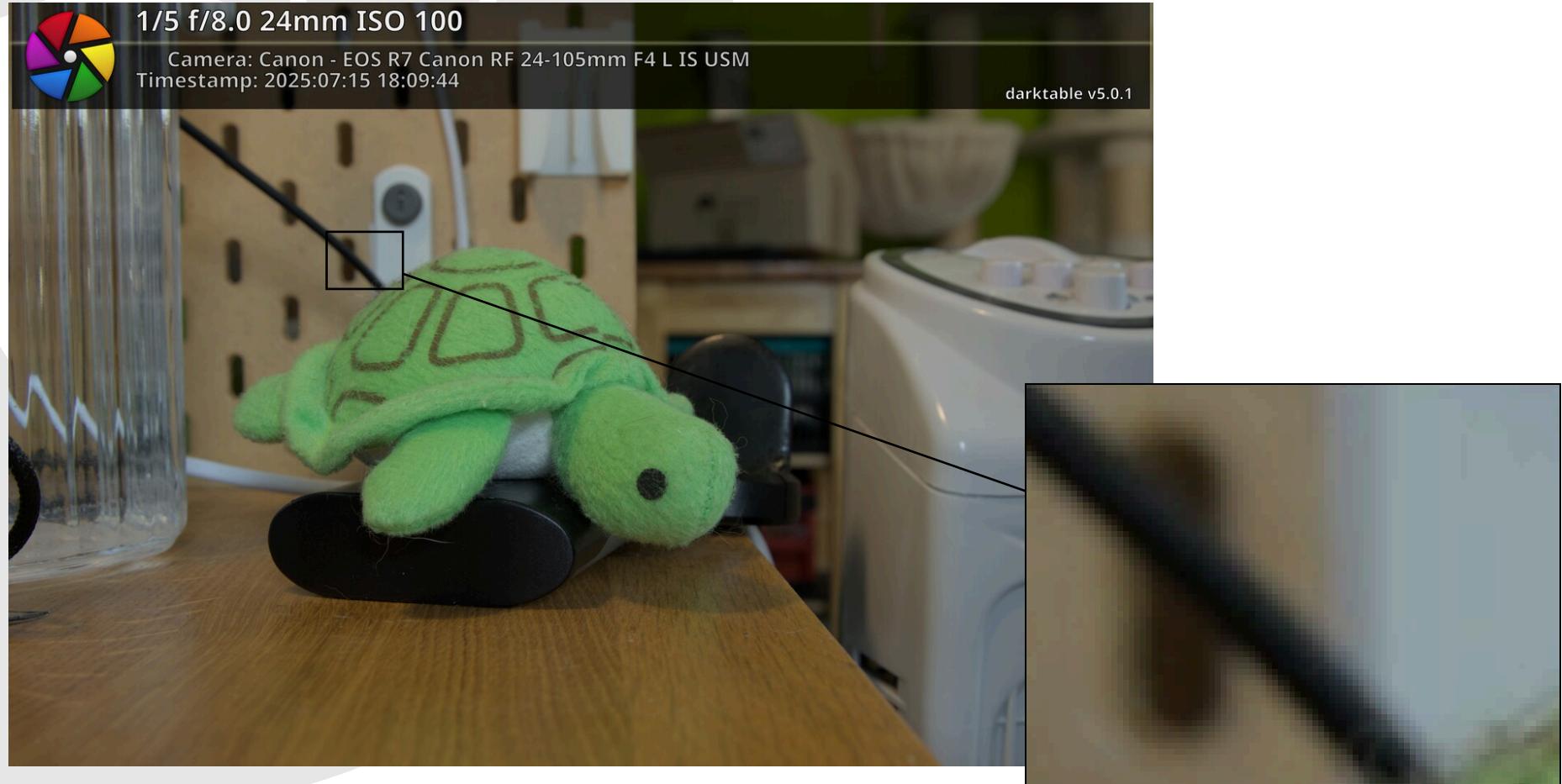
1.8. ISO (Empfindlichkeit)

- ISO gibt ursprünglich Empfindlichkeit des Films in Analogkamera an
 - ▶ ISO 100: $0.1 \text{ lx} \cdot \text{s}$ für Belichtung von 18% Grau
- ISO-Standard 12232:2019 für Digitalkameras definiert mehrere Methoden:
 - ▶ Recommended Exposure Index (REI)
 - ▶ Standard Output Sensitivity (SOS), entspricht dem Film-ISO
 - ▶ Saturation-Based Sensitivity (SAT)
- ⇒ ISO muss nicht einheitlich zwischen Kameras sein!
- Aber: ISO-Wert ist immer linear, doppelte ISO = halbe Belichtungszeit
- Höherer ISO-Wert:
 - ▶ analog: grobkörnigeres Bild
 - ▶ digital: mehr Rauschen

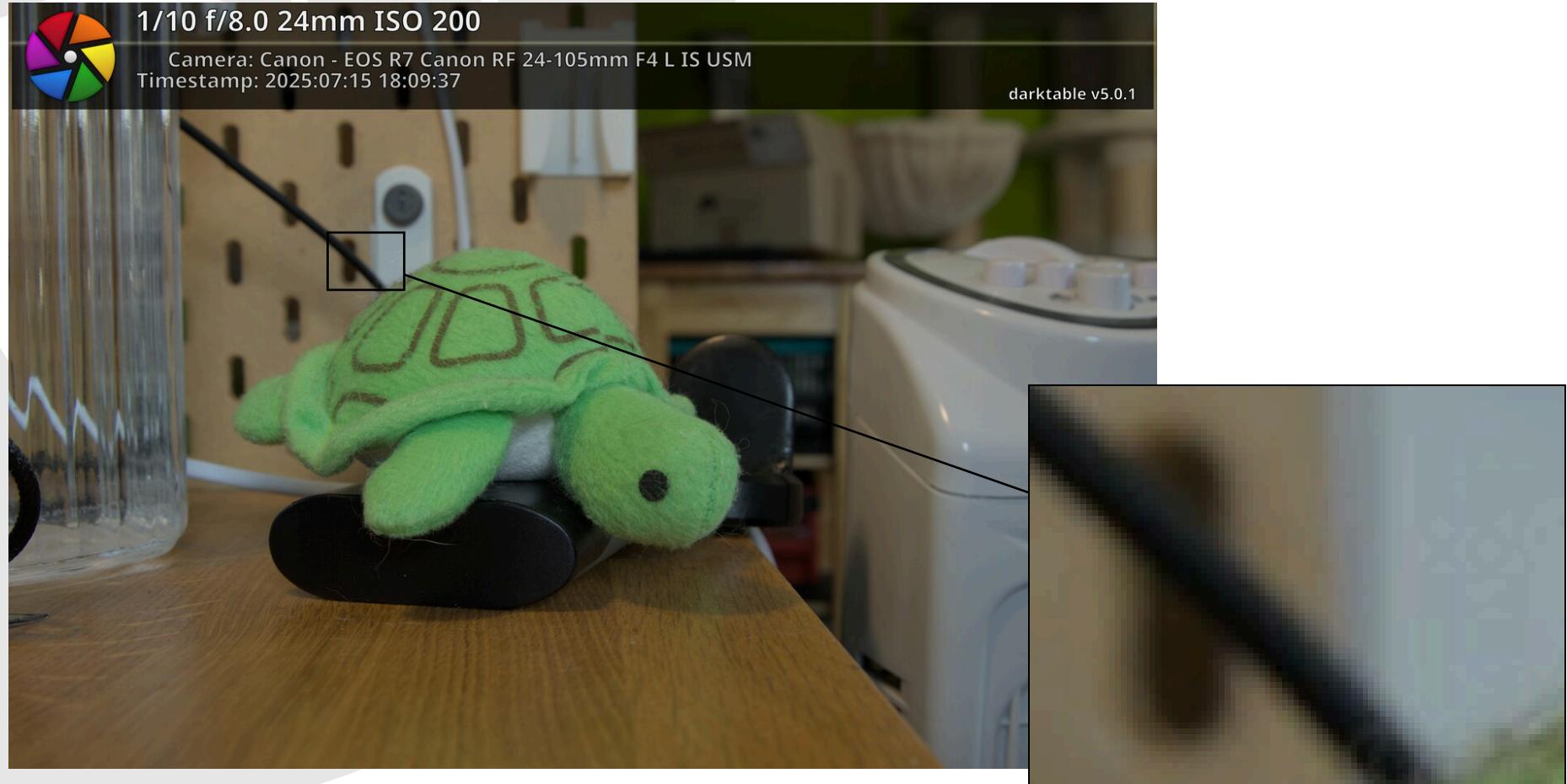
Was bewirkt ISO in der Kamera?

- Vor AD-Wandler: Verstärkung des Signals der Fotodioden
- Bei manchen ISO-Werten, nach AD-Wandlung noch digitale Anpassung des Helligkeitswerts
- Welche ISO-Werte tatsächlich die analoge Verstärkung beeinflussen und welche simuliert sind, hängt von der Kamera ab

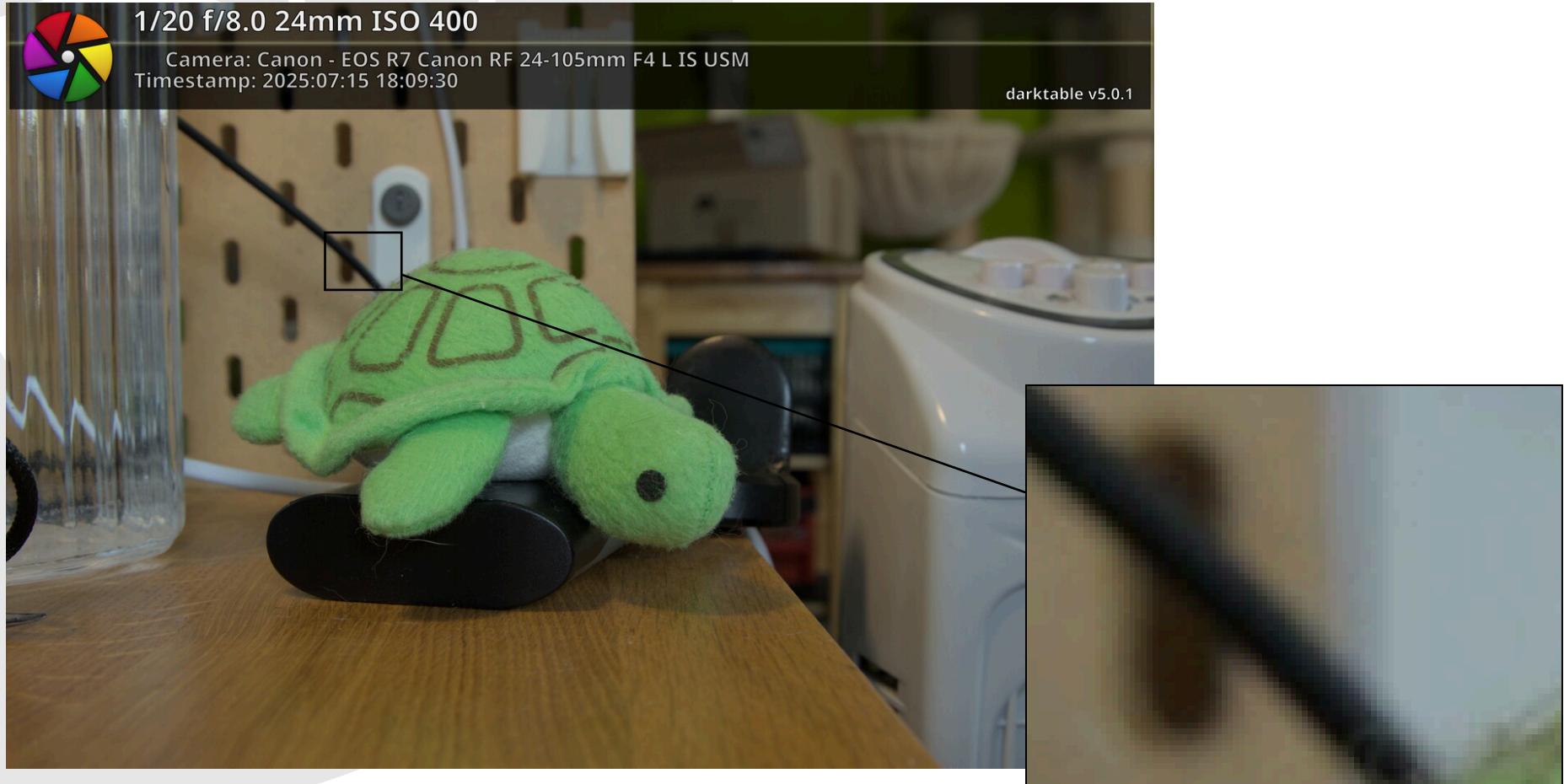
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



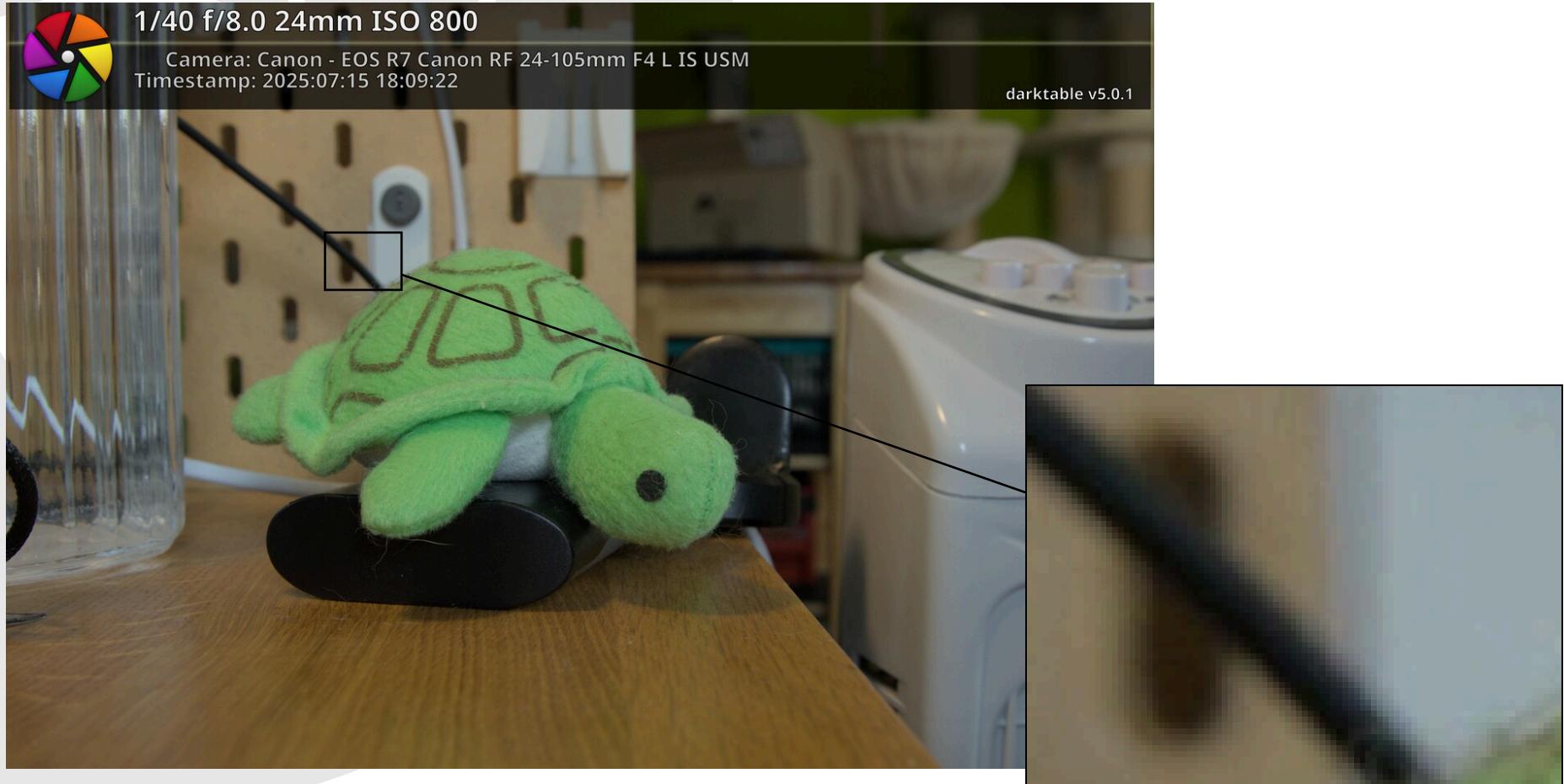
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



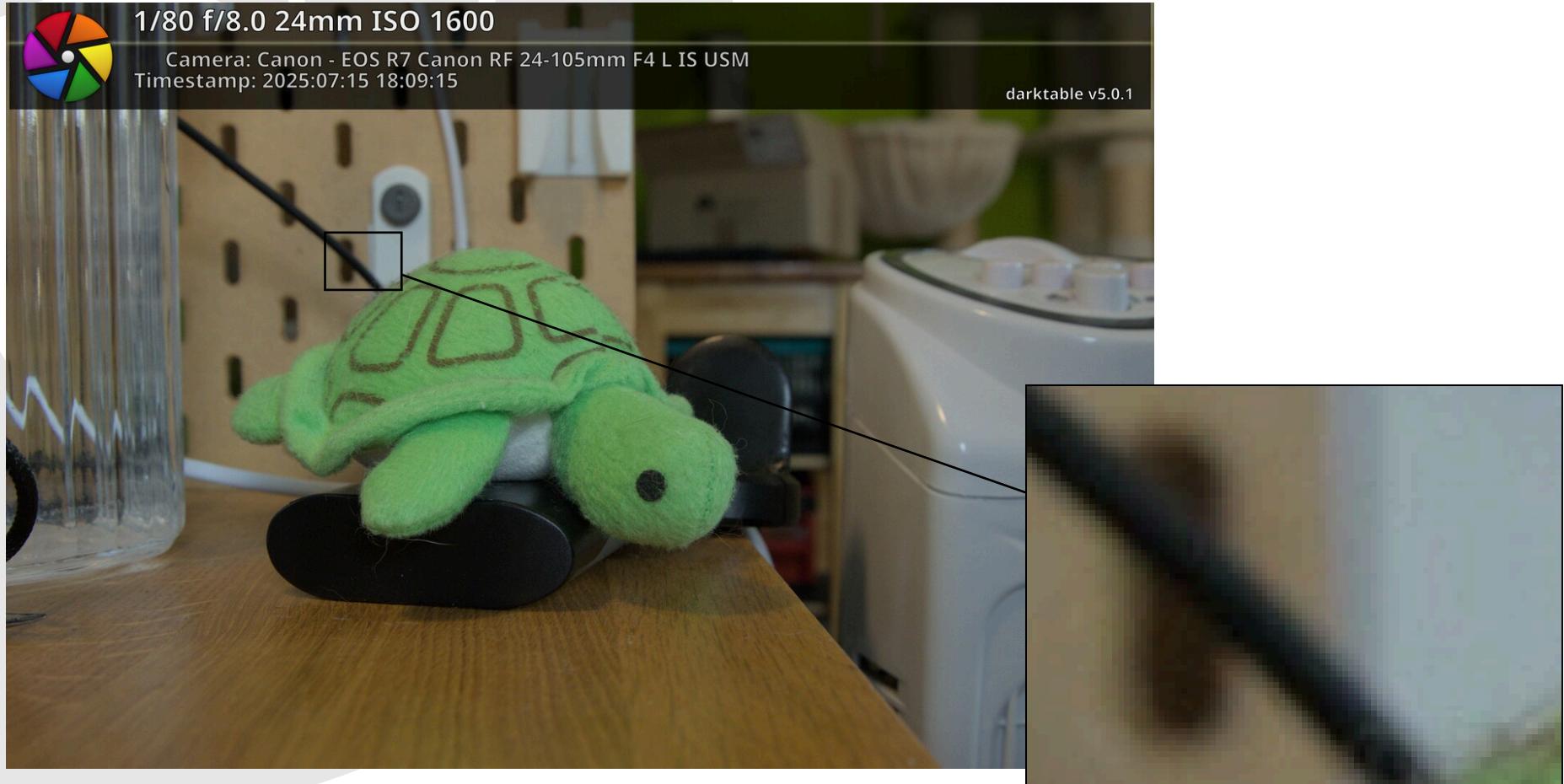
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



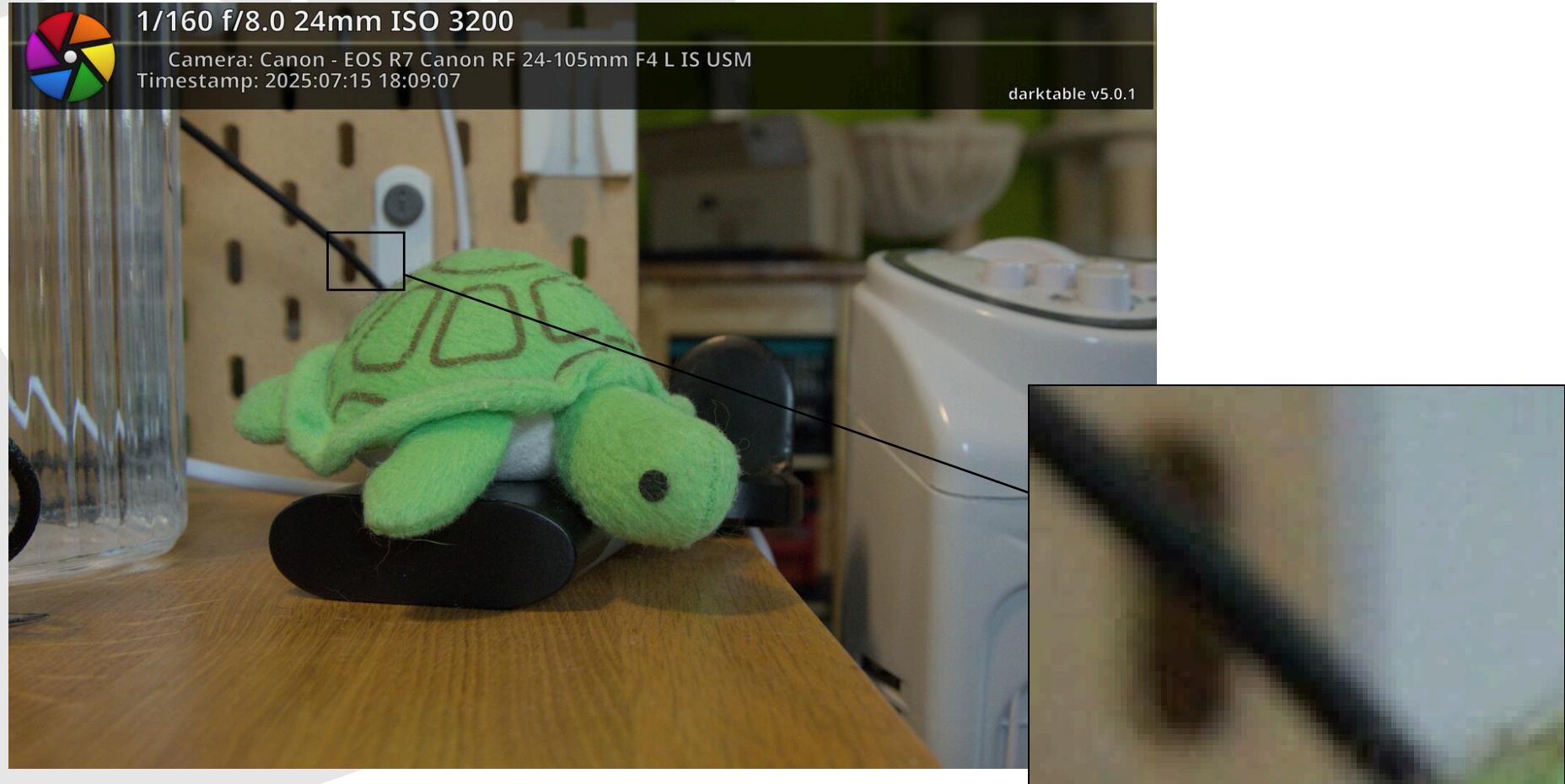
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



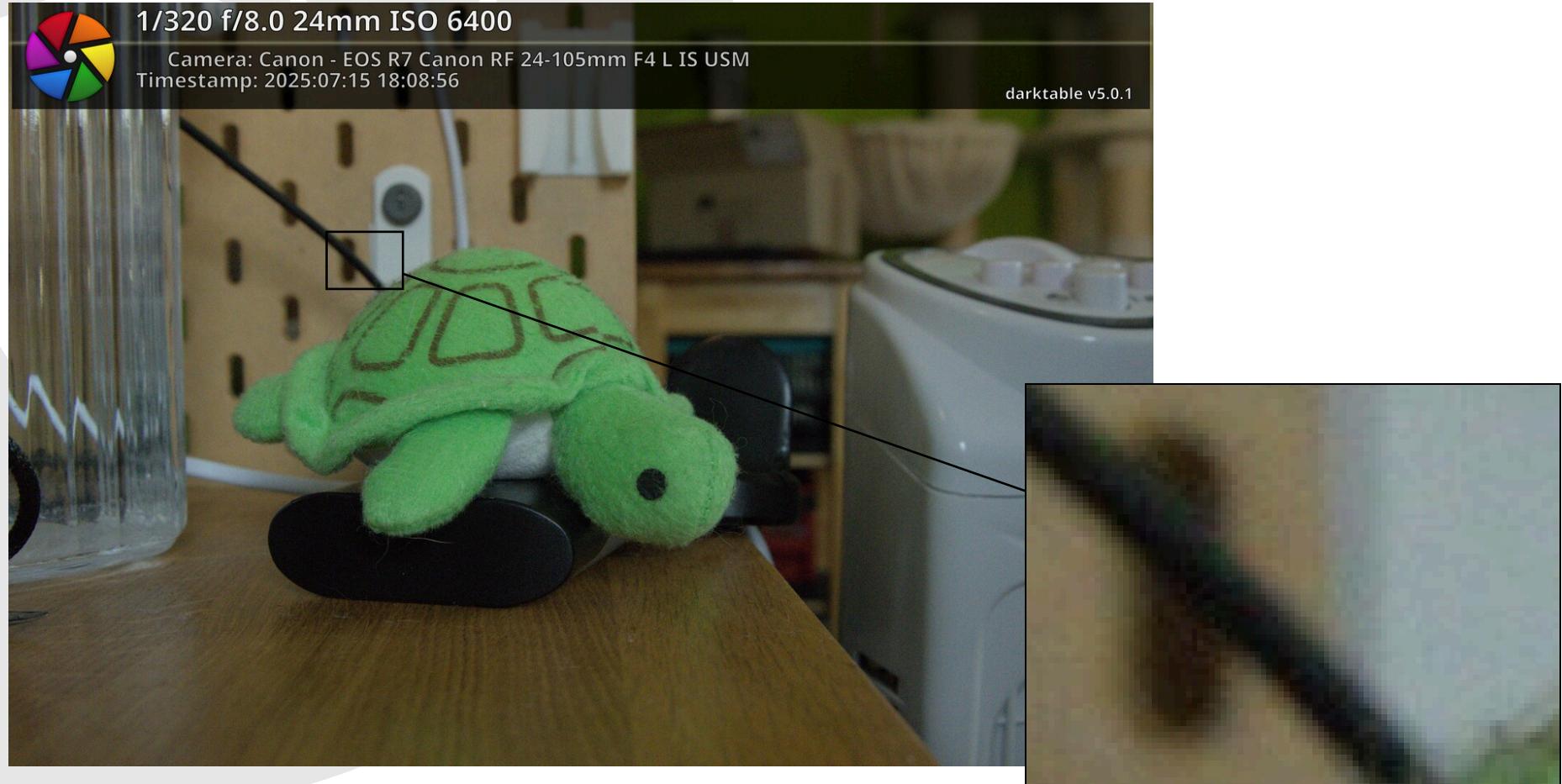
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



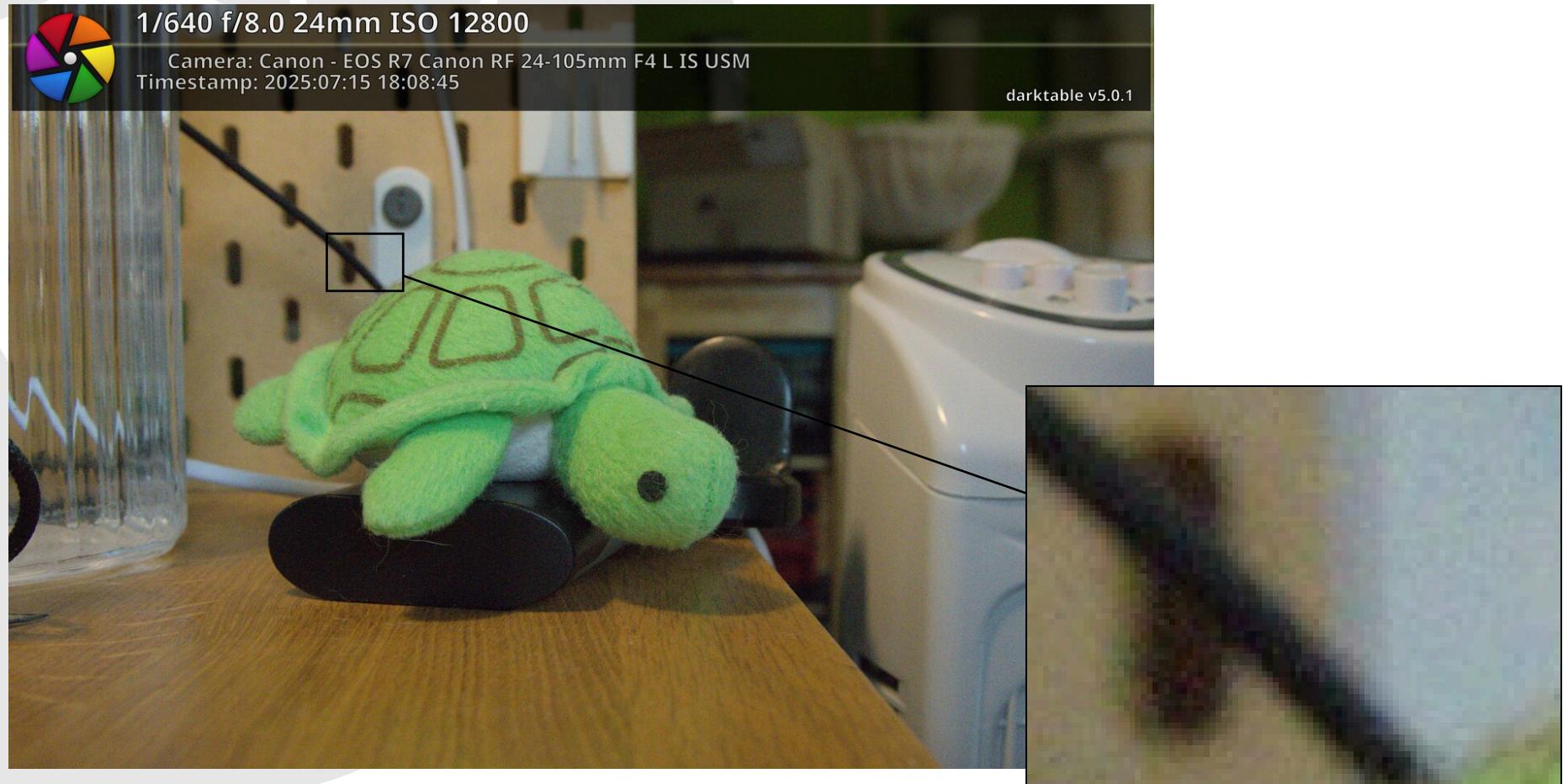
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



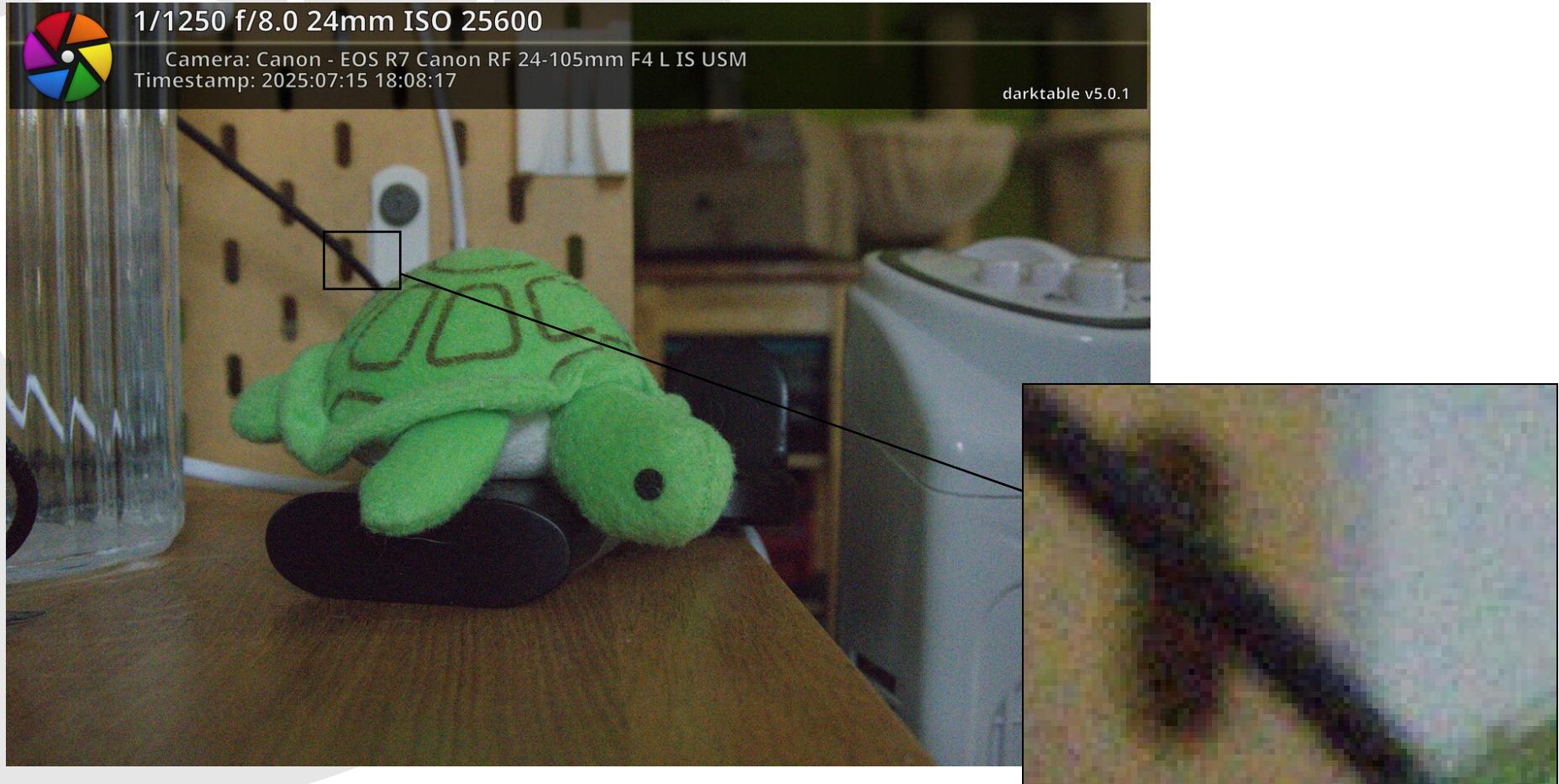
1.8. ISO (Empfindlichkeit)



1.8. ISO (Empfindlichkeit)



1.8. ISO (Empfindlichkeit)





02

Autofokus

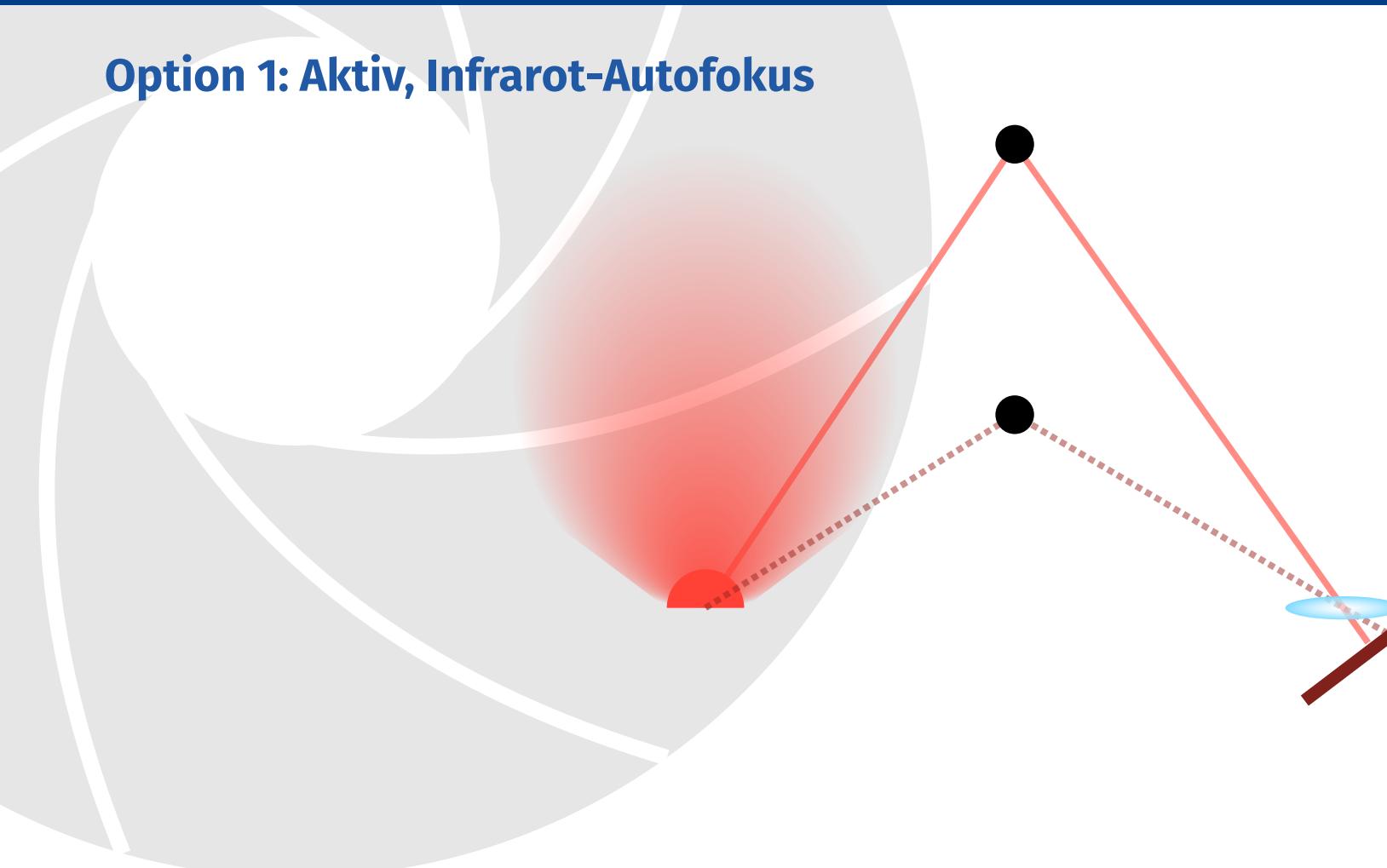
Option 1: Aktiv, Infrarot-Autofokus



Canon AF35M mit IR-AF

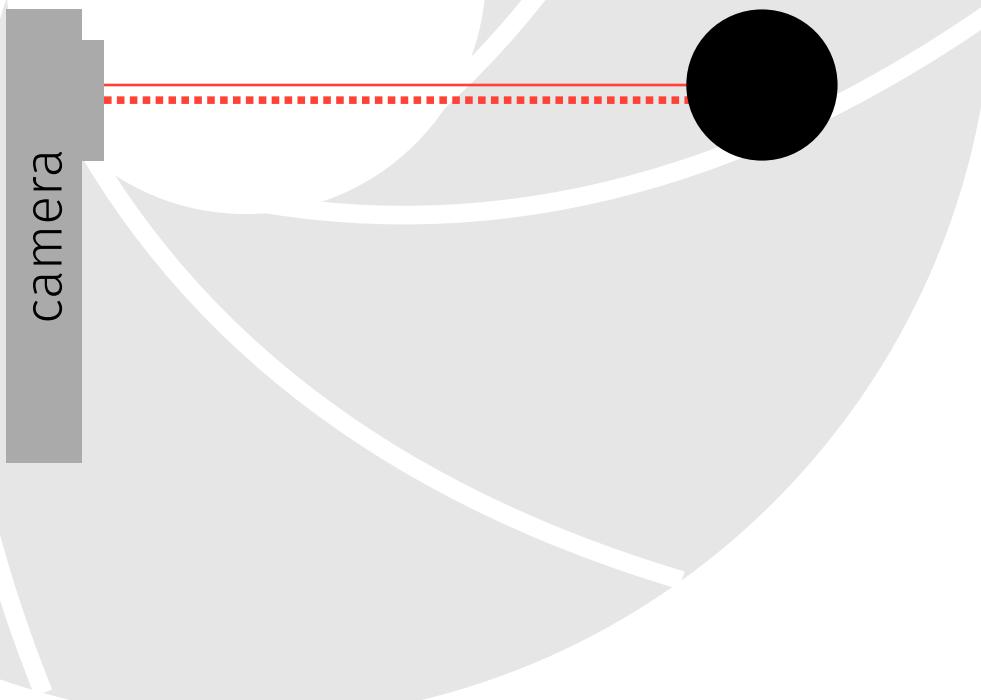
Kingkong21, CC BY 2.5, via Wikimedia Commons

Option 1: Aktiv, Infrarot-Autofokus



Option 2: Aktiv, Time-Of-Flight

- Laser + Zeitmessung \Rightarrow Entfernung
- In aktuellen Smartphones, sonst eher in Industrie und Medizingeräten



Option 3: Passiv, Kontrast-AF

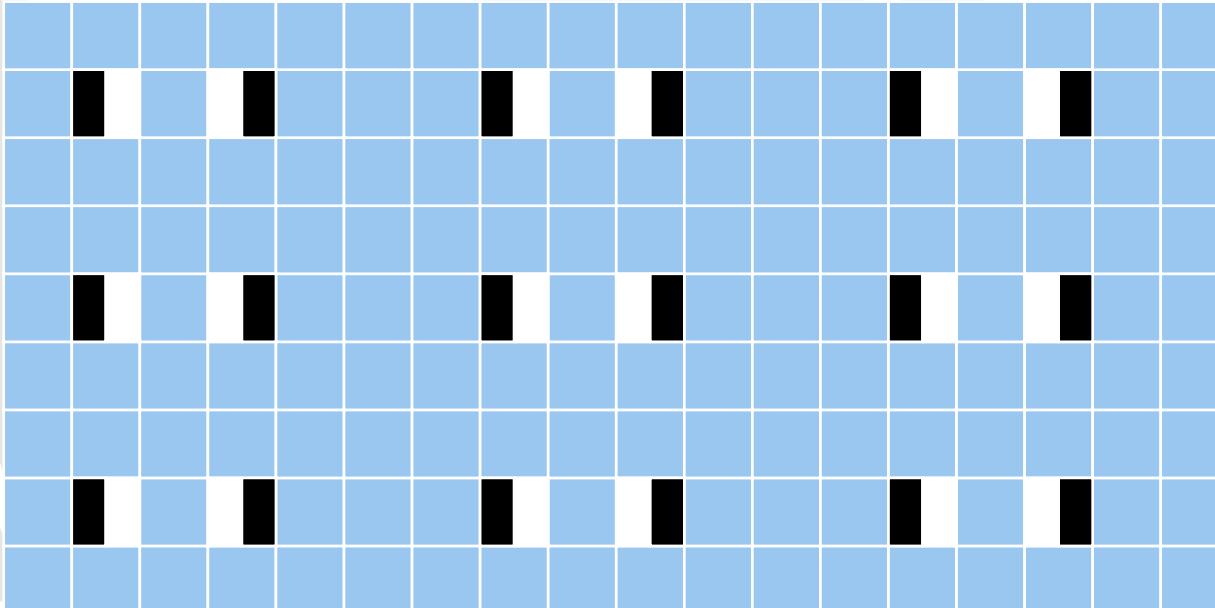
- Kontrast zwischen Pixeln steigt bei höherer Schärfe
- Gute Qualität, auf ganzen Bildbereich anwendbar, aber langsam
- Bei SLRs im Live-View-Modus, bei spiegellosen Kameras üblich

Option 4a: Passiv, Phasen-Autofokus mit separatem Sensor

- SLRs besitzen separaten Sensor für Autofokus
- Misst Phasenverschiebung des Lichts:
 - Zwei Sensoren messen Licht, das durch verschiedene Teile der Linse kommt
 - Unterschied zwischen Sensoren ⇒ Objekt zu nah, zu fern oder im Fokus
- (Hier Flash Applett (ja wirklich) zeigen, [Danke an Uni Stanford](#))

Option 4b: Passiv, Phasen-Autofokus in der Bildebene

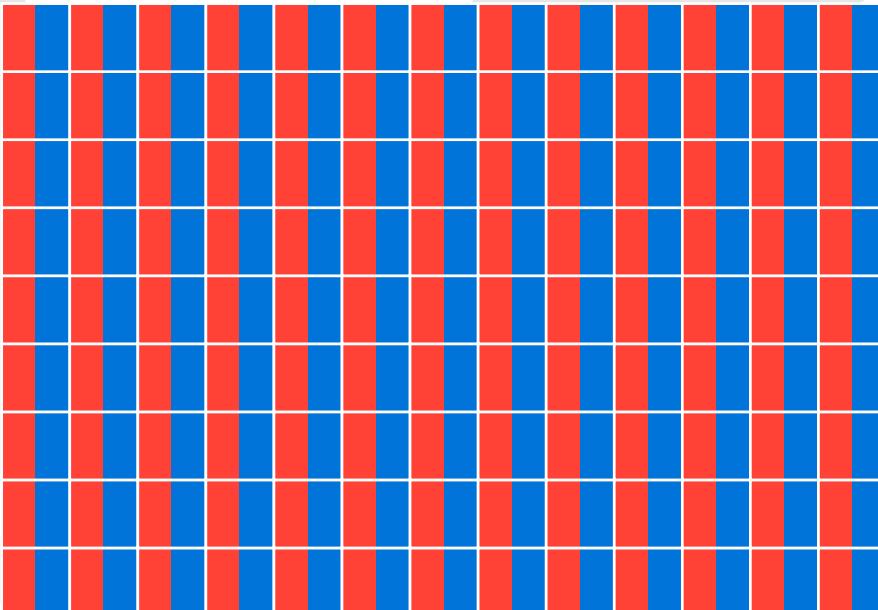
- Phasen-Messpixel im Sensor
- paarweise Pixel, bei denen Photodiode einmal nach links und einmal nach rechts verschoben sind



- fehlende Bildpixel
- Interpolation nötig

Option 4c: Passiv, Dual-Pixel-Autofokus

- Zwei Photodioden in jedem Pixel unter selber Mikrolinse
- separates Auslesen für AF, zusammen auslesen für Bild
- Zuerst bei Canon, mittlerweile auch von u.a. Sony, damit auch in Smartphones



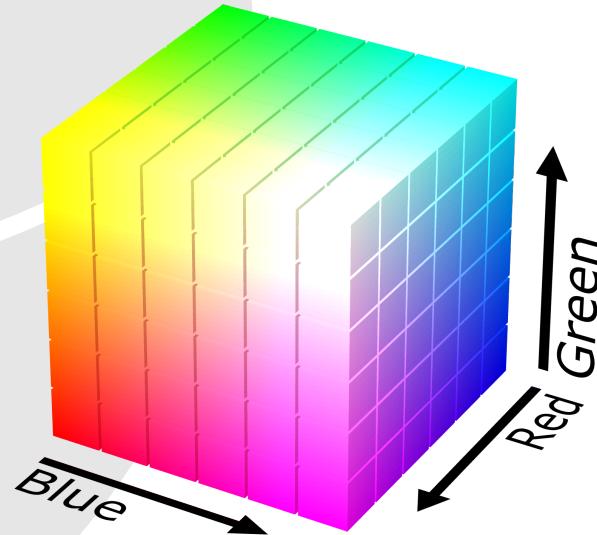
- Abdeckung des kompletten Bildbereichs
- Varianten (Sony): 2x2 OCL, Octa PD
für mittlere und große Sensoren
("Vollformat" gilt hier als klein)



03

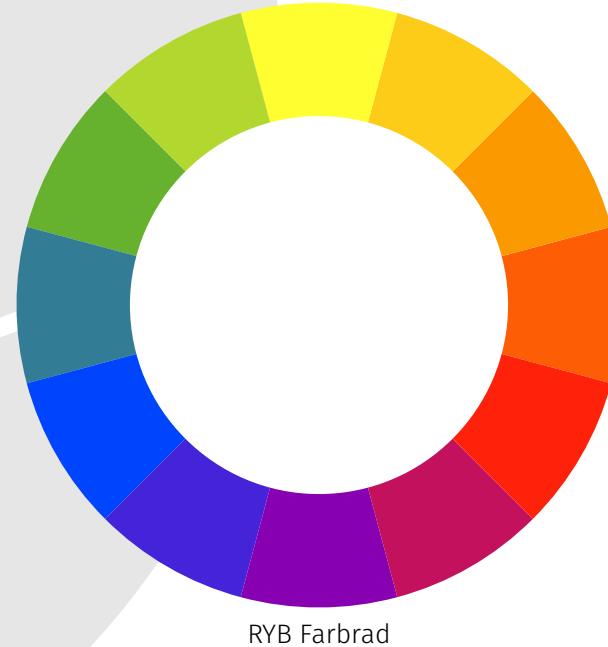
Farbmodelle

Additives Farbmodell: RGB



RGB Farbmodell in Würfeldarstellung
SharkD, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

Subtraktive Modelle: RYB



Subtraktive Modelle: CMY(K)

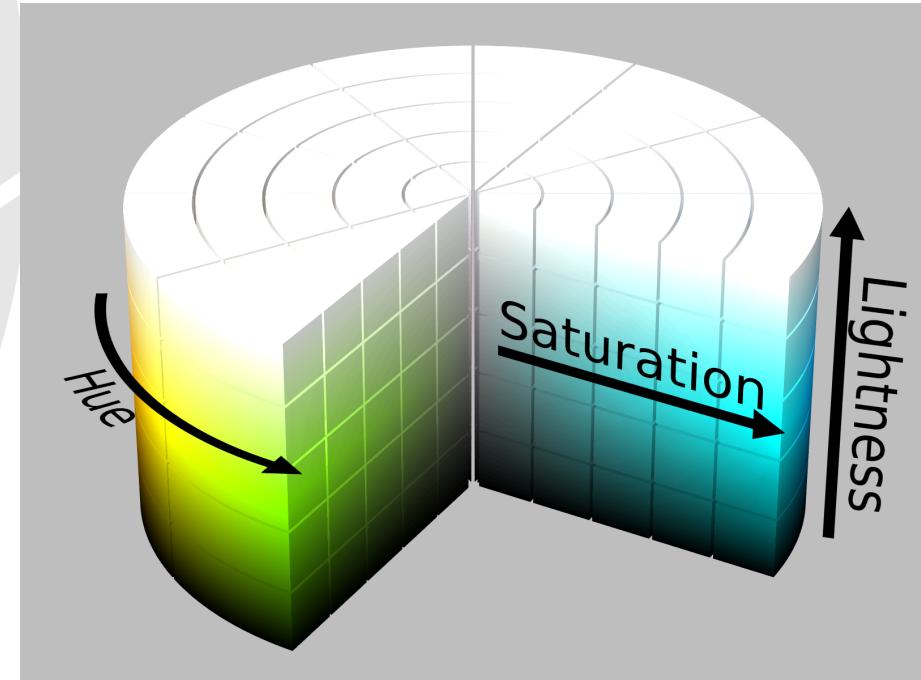


Vergleich CMY zu CMYK

Jon Sullivan, PD Photo; Color separation by Jacob Rus, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

weitere Farbmodelle

- HSL – Farbton, Sättigung, Helligkeit

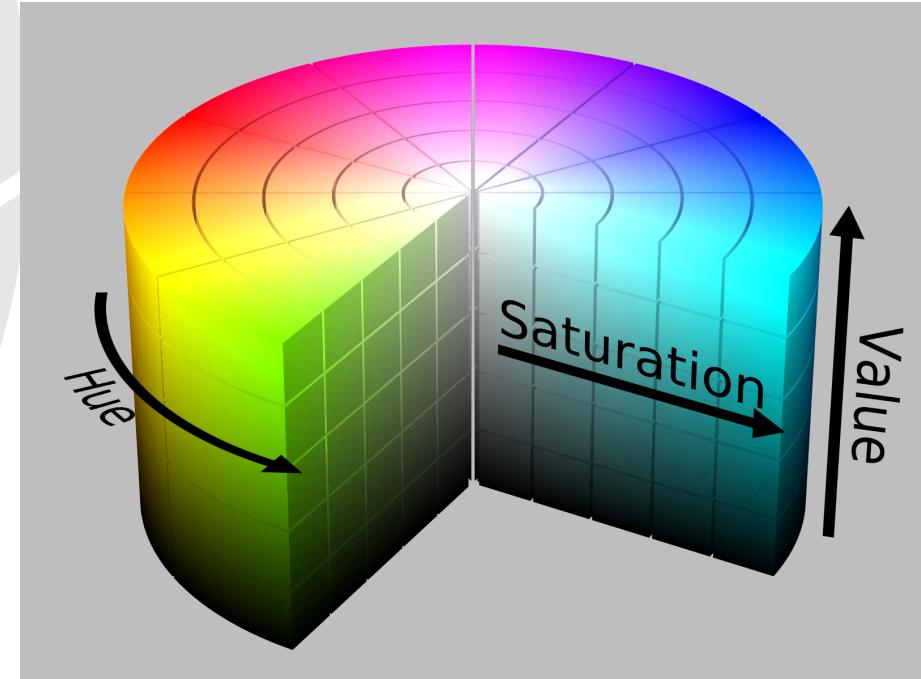


HSL Zylinder

SharkD, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

weitere Farbmodelle

- HSL – Farbton, Sättigung, Helligkeit
- HSV – Farbton, Sättigung, Wert



HSV Zylinder

SharkD, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

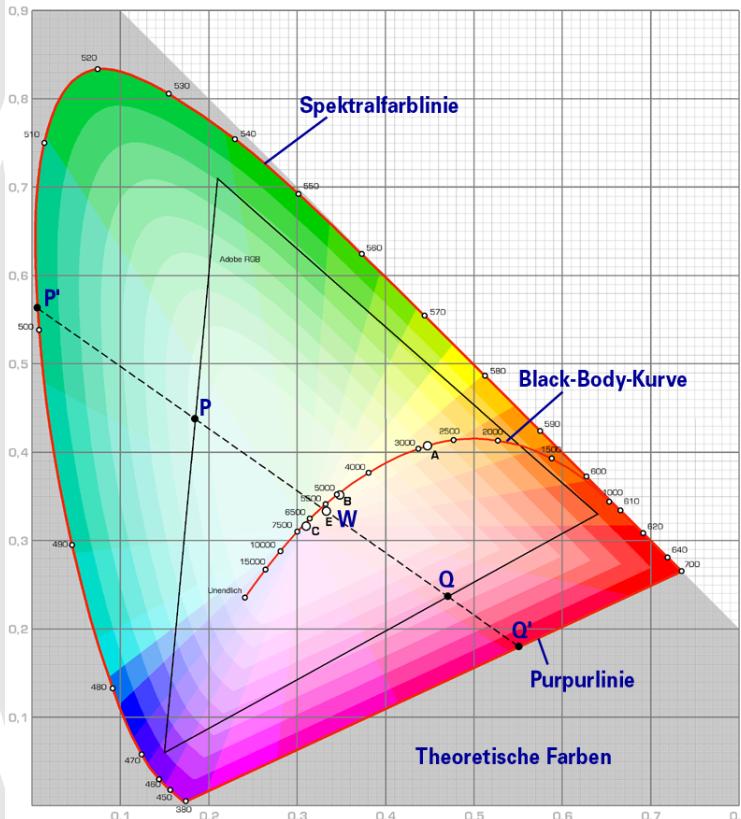


04

Farträume

- Farbmodelle nicht absolut: **RGB #FF0000** schaut nicht auf jedem Display gleich aus
- Für konsistente Darstellung: Farbräume notwendig
- Profile können zwischen Farbräumen mappen (z.B. Farbraum des Kamerasensors und des Monitors)

Chromatizitätsdiagramm

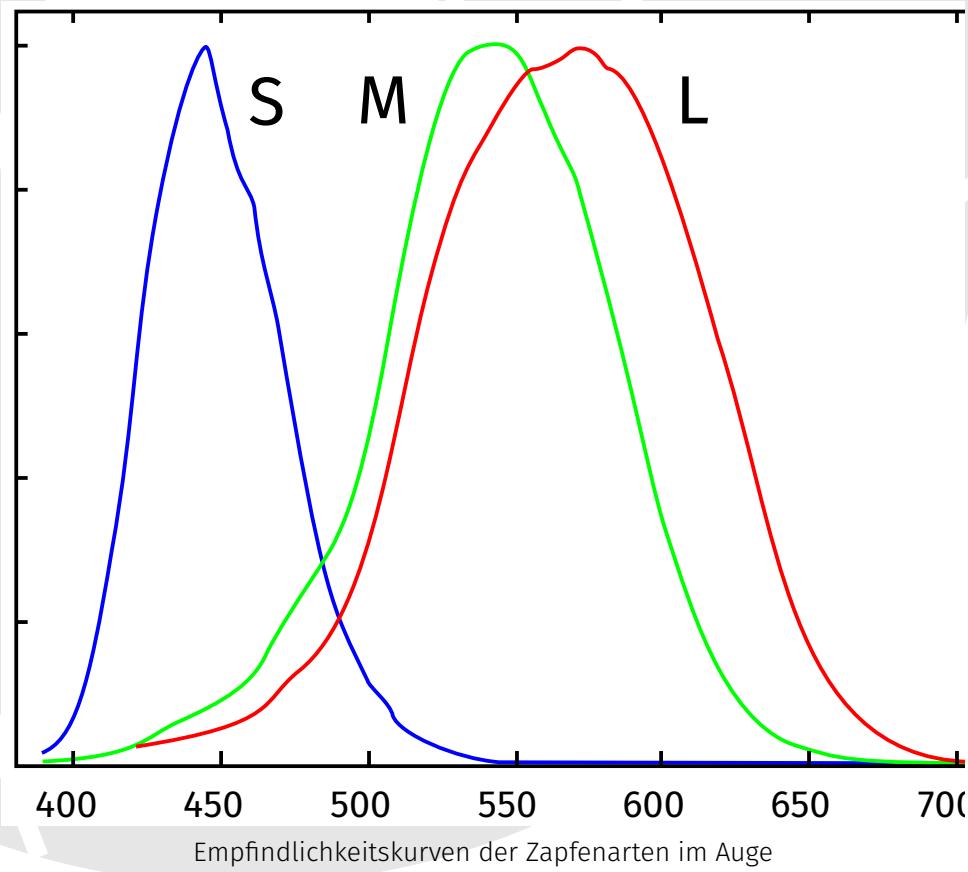


Normfarbtafel mit Beispiel-Farbraum

Torge Anders, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

- Stellt von Menschen wahrnehmbare Farben dar
- Dreieck: Farbraum mit drei Primärvalenzen
 - ▶ Gamut: Menge der Farben im Farbraum
 - ▶ Gamut-Farben als Vektorsumme darstellbar
- W: Weißpunkt des Farbraums
 - ▶ liegt auf der Black-Body-Kurve
- P, Q: Komplementärfarben
- P', Q': Spektralfarben zu P, Q

Farbwahrnehmung



- Ergibt LMS-Farbraum
 - ▶ Muss kompletten Spektralfarbzug abdecken
 - ▶ Reine Grundvalenzen nicht möglich wegen Überschneidung
⇒ Form der Spektralfarblinie

CIE-Normvalenzsystem

- basiert auf experimentell ermitteltem “Normalbeobachter”
- Ergebnis: Spektralwertfunktionen \bar{r} , \bar{g} , \bar{b}
- Durch lineare Transformation ergeben sich \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} ohne negative Werte

XYZ-Farbraum

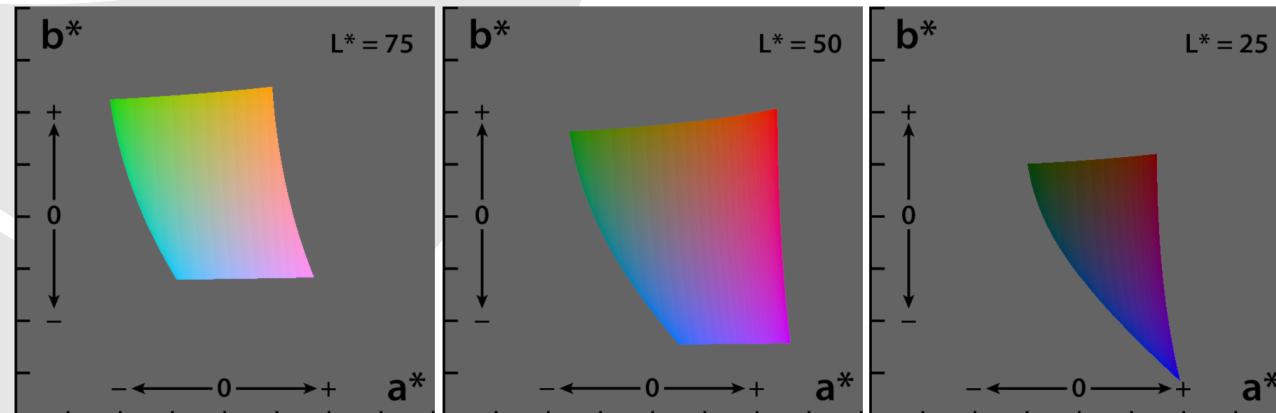
- Einsetzen von Wellenlängen ergibt Koordinaten im XYZ-Farbraum

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$
$$\Rightarrow x + y + z = 1$$

- x und y sind die Achsen der Normfarbtafel
- Referenzfarbraum für andere Farträume

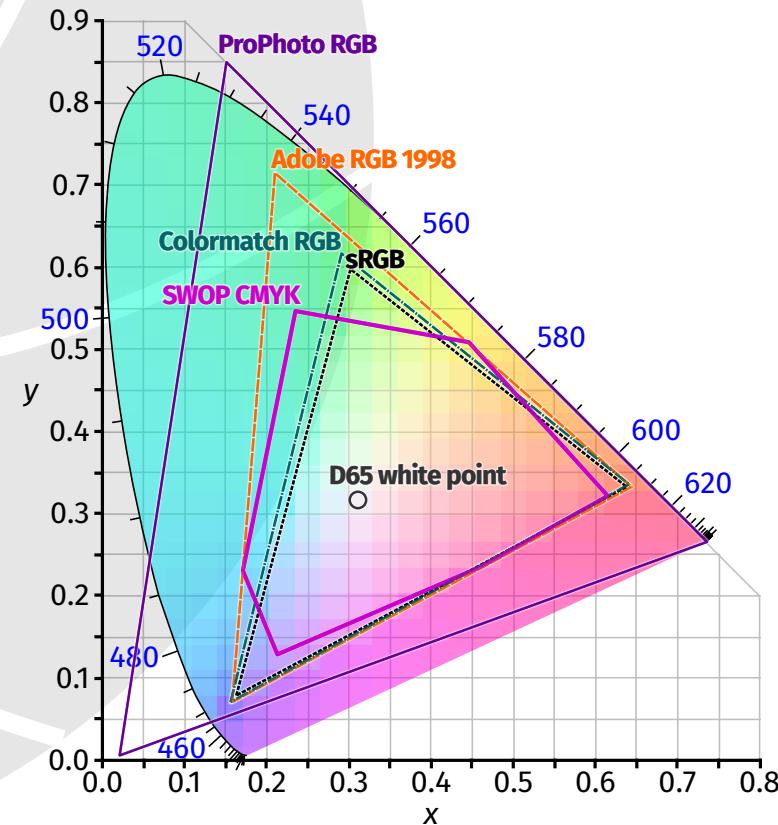
Lab-Farbraum

- Abgeleitet vom XYZ-Farbraum, mehr “perceptually uniform”
- L : Wahrgenommene Helligkeit
- a : Achse von grün nach rot
- b : Achse von blau nach gelb
- Umrechnung von XYZ nach Lab abhängig vom Weißpunkt



Jacob Rus, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

Gebräuchliche Farbräume



BenRG and cmglee, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons