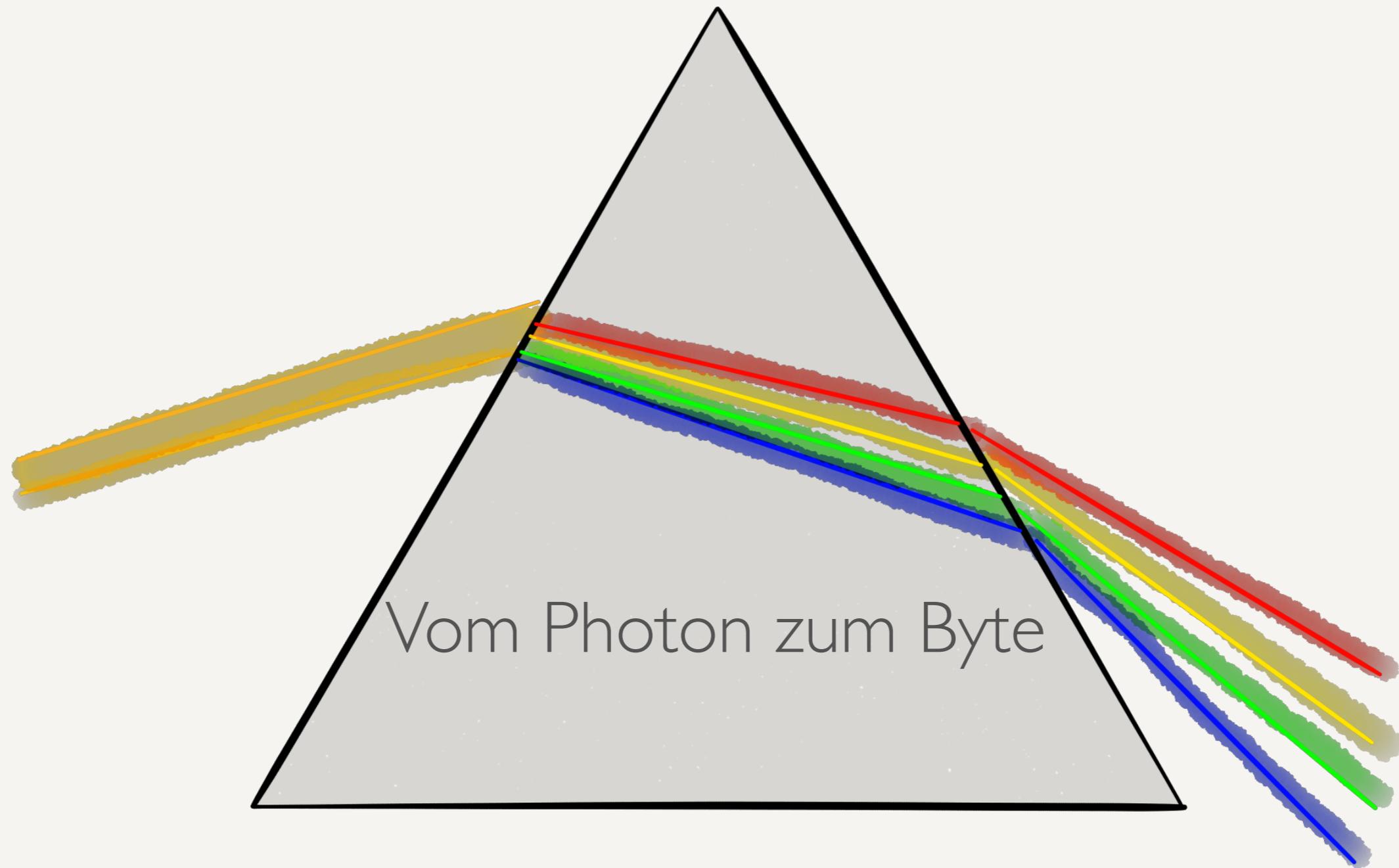


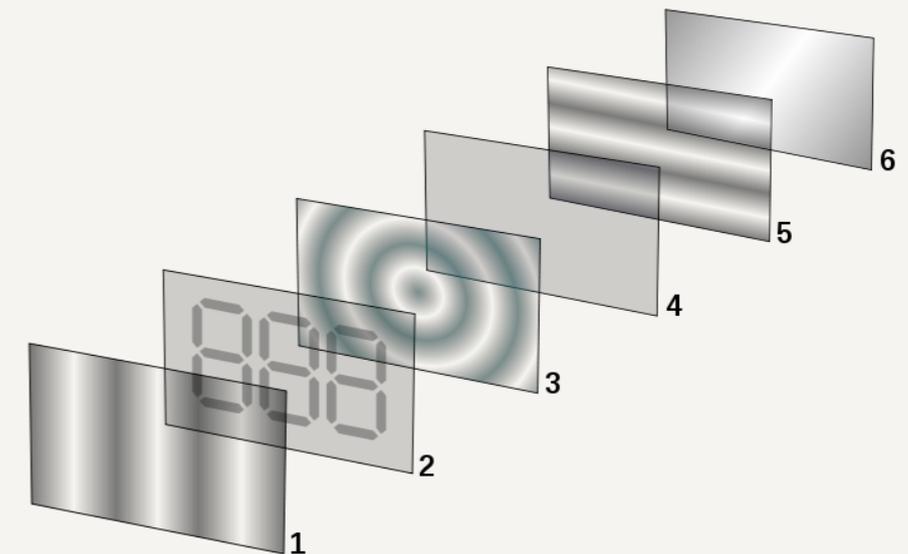
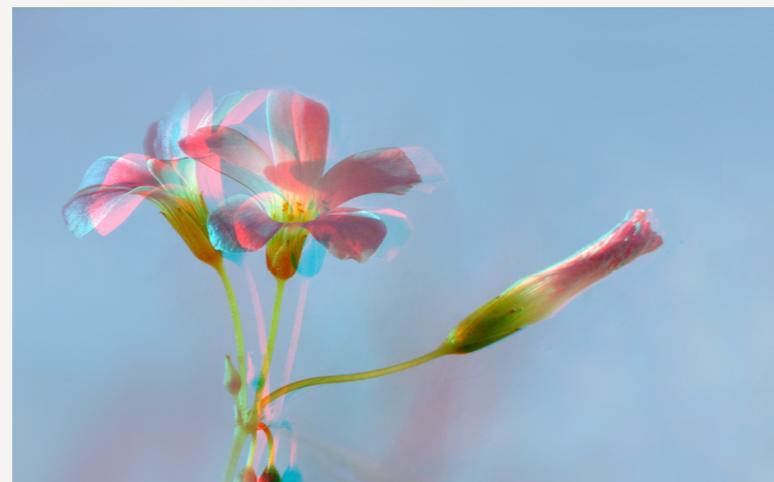
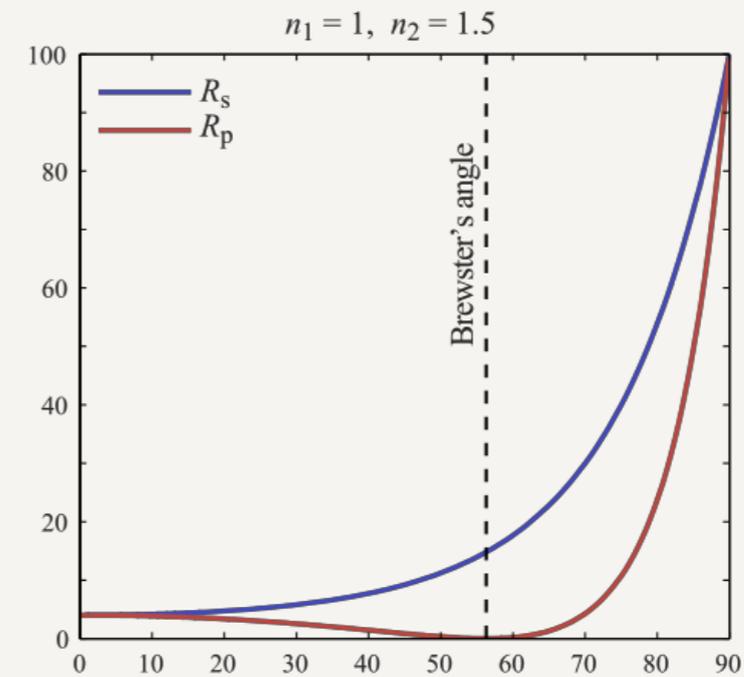
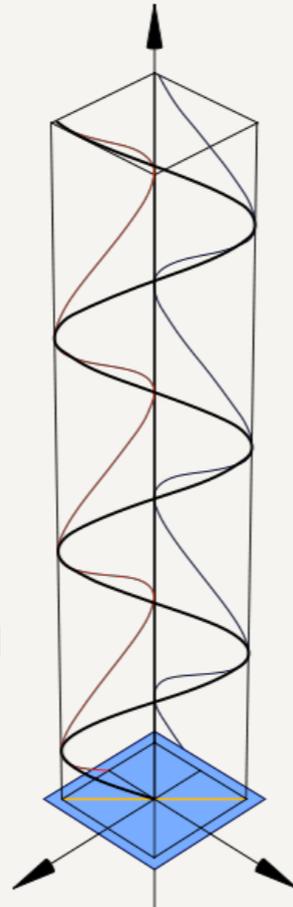
# Photonik

## Technische Nutzung von Licht



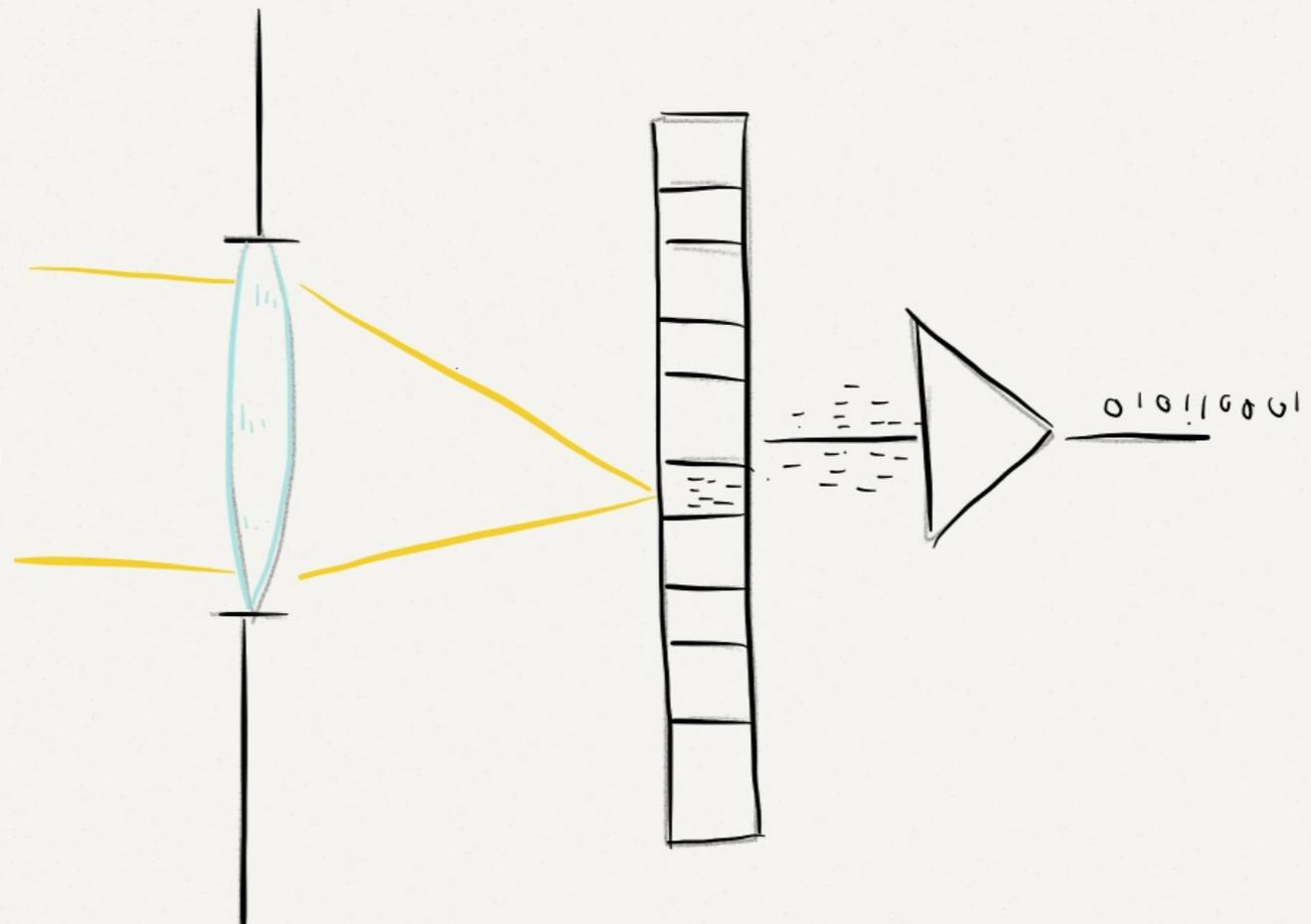
# Wiederholung Polarisation

- Polarisation
- Fresnel'sche Formeln
- Brewster Winkel
- LCDs
- Stereoskopie
- Doppelbrechung



# Überblick für Heute: Vom Photon zum Byte

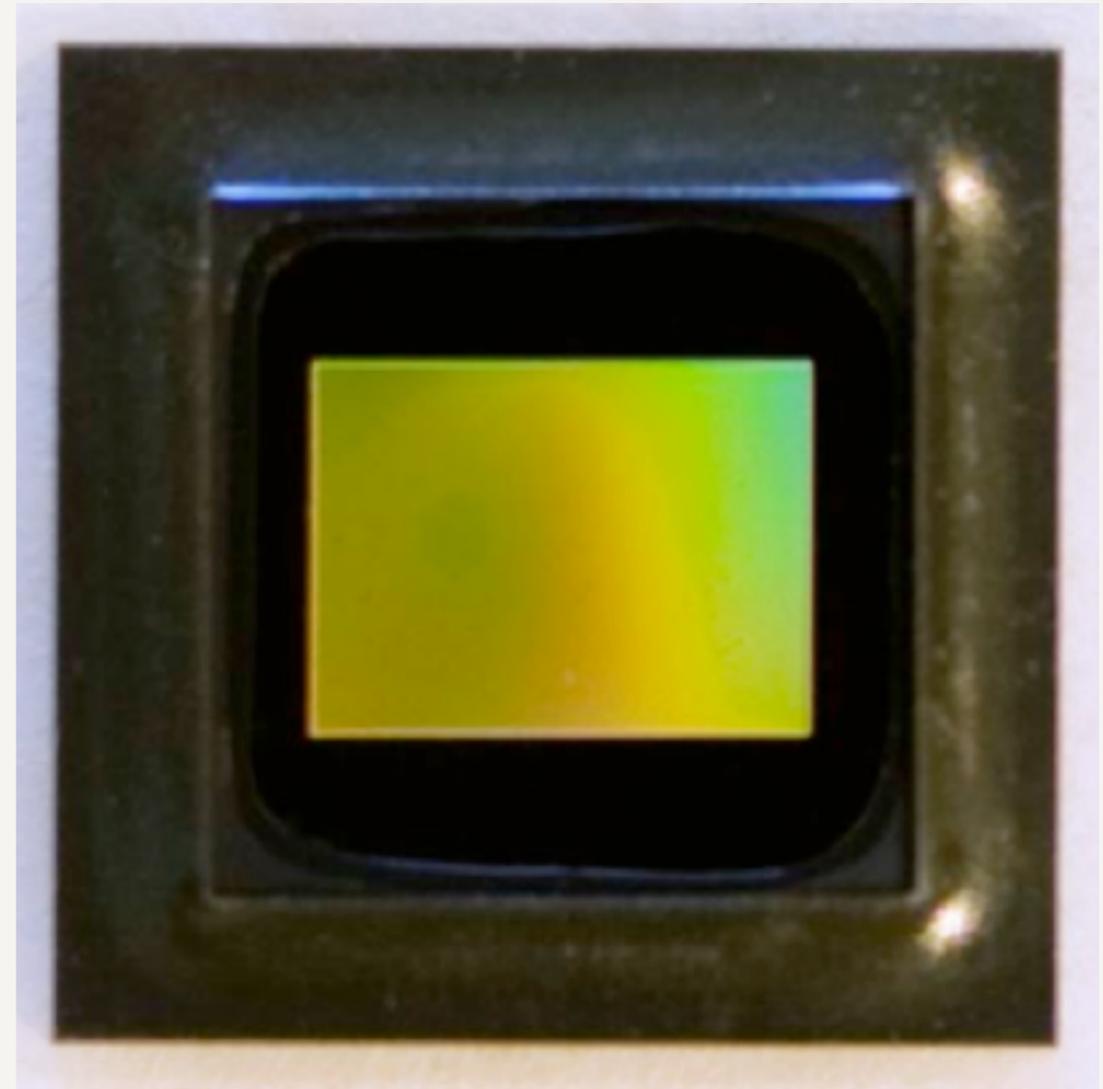
- Optik
- Licht zu Strom
- Strom zu Code (= analog zu digital)
- High Dynamic Range
- Rauschen und SNR



# Sensoren

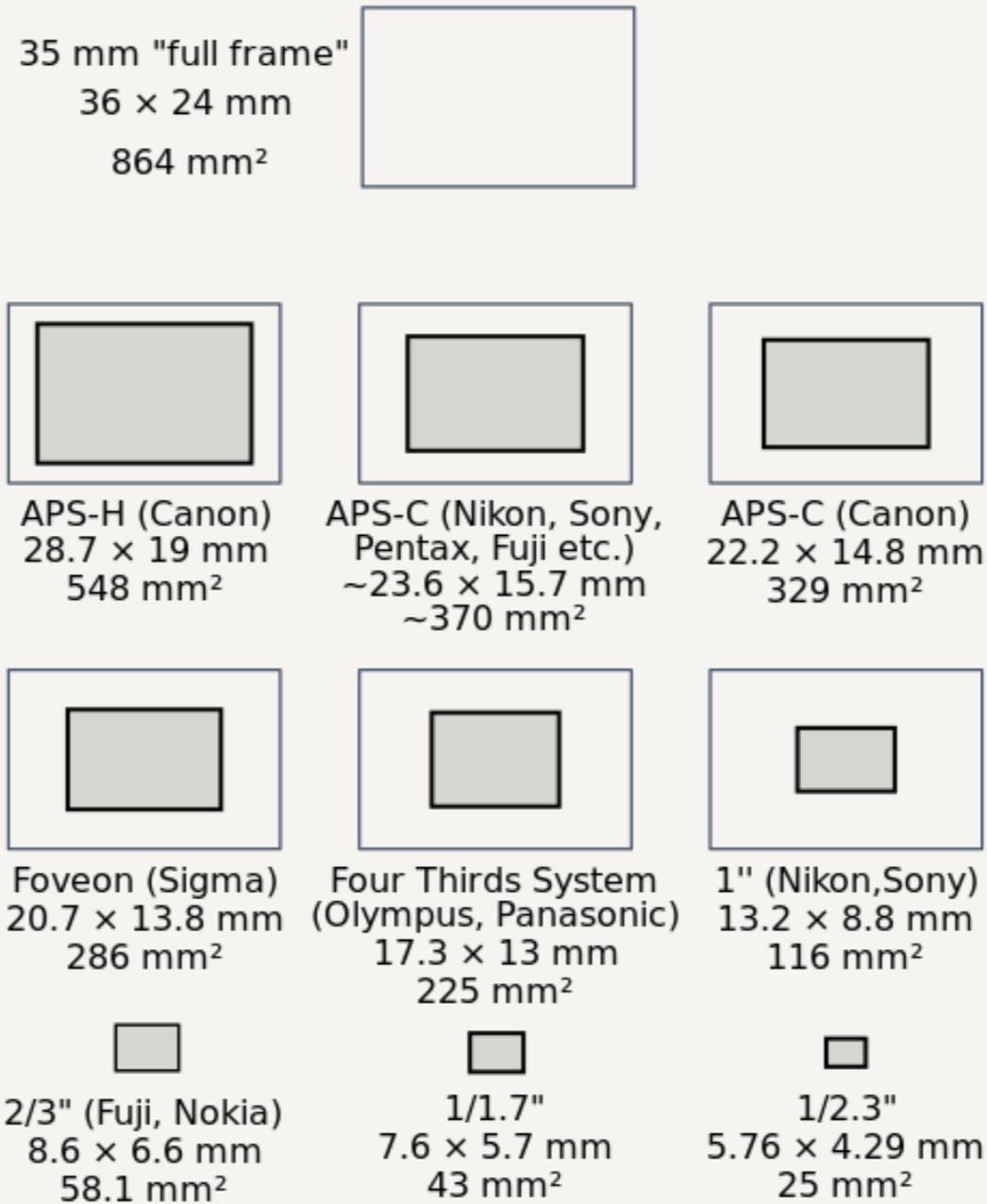
# CMOS-Sensor

- *Complementary Metal Oxide Semiconductor* bezeichnet den Produktionsprozess
- Beim CCD-Bildaufnehmer wird pro Pixel Ladung gesammelt und zum ADC verschoben.
- Beim CMOS-Bildaufnehmer wird pro Pixel eine Verstärkerschaltung integriert, die die Ladung in Spannung umsetzt.



Quelle: [edn.com](http://edn.com)

# Sensorgrößen



# CMOS-Sensoren

Anwendung	Smartphone	Vollformat Spiegelreflex	Industrie-Anwendung	Zeilenkamera
Sensor + Format	Sony IMX219PQ 1/4	Nikon D4S Full	ONS Python 1300 1/2	Awaiba DR-4k-7
Pixelzahl	3296 × 2512 8.3 MP	4936 × 3288 16.2 MP	1280 × 1024 1.3 MP	4096 × 1 0.004 MP
Pixelgröße / $\mu\text{m}$	1,12	7,3	4,8	7
Auslesegeschwindigkeit / fps	180 (720p) 60 (1080p)	11 60 (1080p)	210	80.000
Shutter	rolling (?)	rolling (?)	global	N/A
ADC / bit	10 (?)	14	10	8 / 10 / 12
Bauart	BSI	FSI (?)	FSI	FSI (?)

IMX219PQ

Nikon D4S

Python 1300

Awaiba DR-4k-7

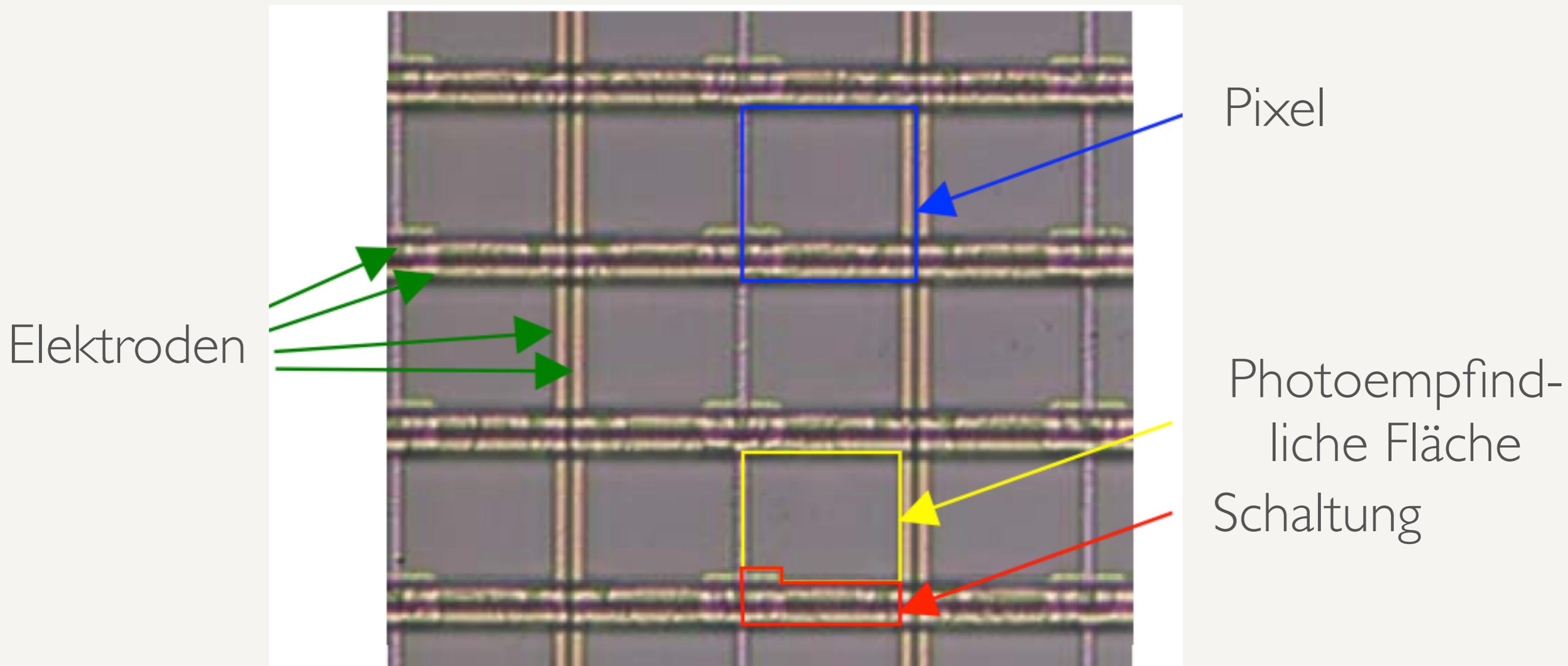
# CMOS-Sensoren

- Finden Sie heraus welcher CMOS-Sensor in Ihrem Smartphone verbaut ist.
- Suchen Sie die technischen Daten heraus:

<http://photonics.specpick.com/search/cmos-image-sensors>

# CMOS-Sensor Aufbau

Estribeau, Magali and Magnan, Pierre Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted-edge methodology. (2004) In: SPIE Optical System Design 2003

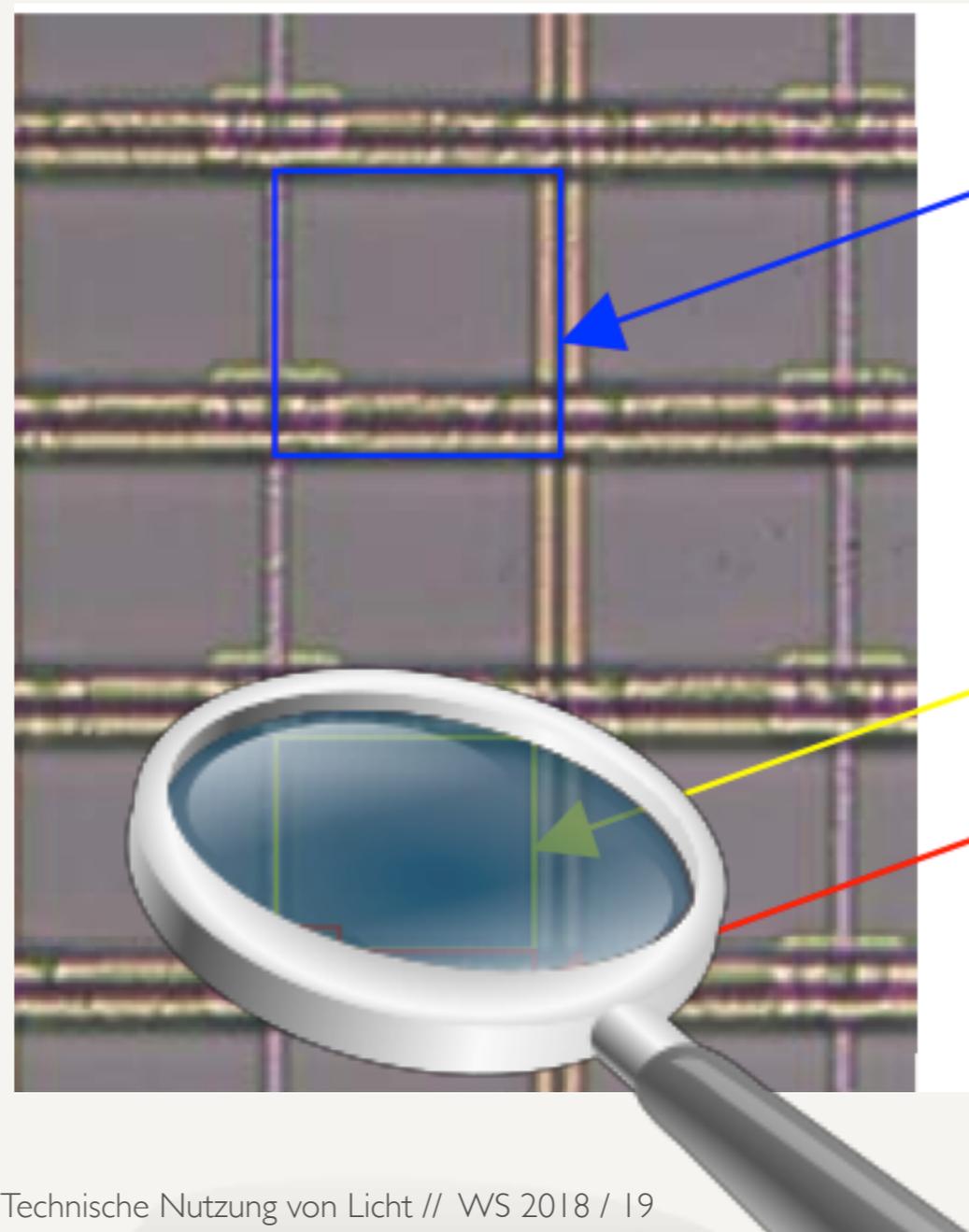


# CMOS-Sensor

## Füllfaktor

Estribeau, Magali and Magnan, Pierre Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted-edge methodology. (2004) In: SPIE Optical System Design 2003

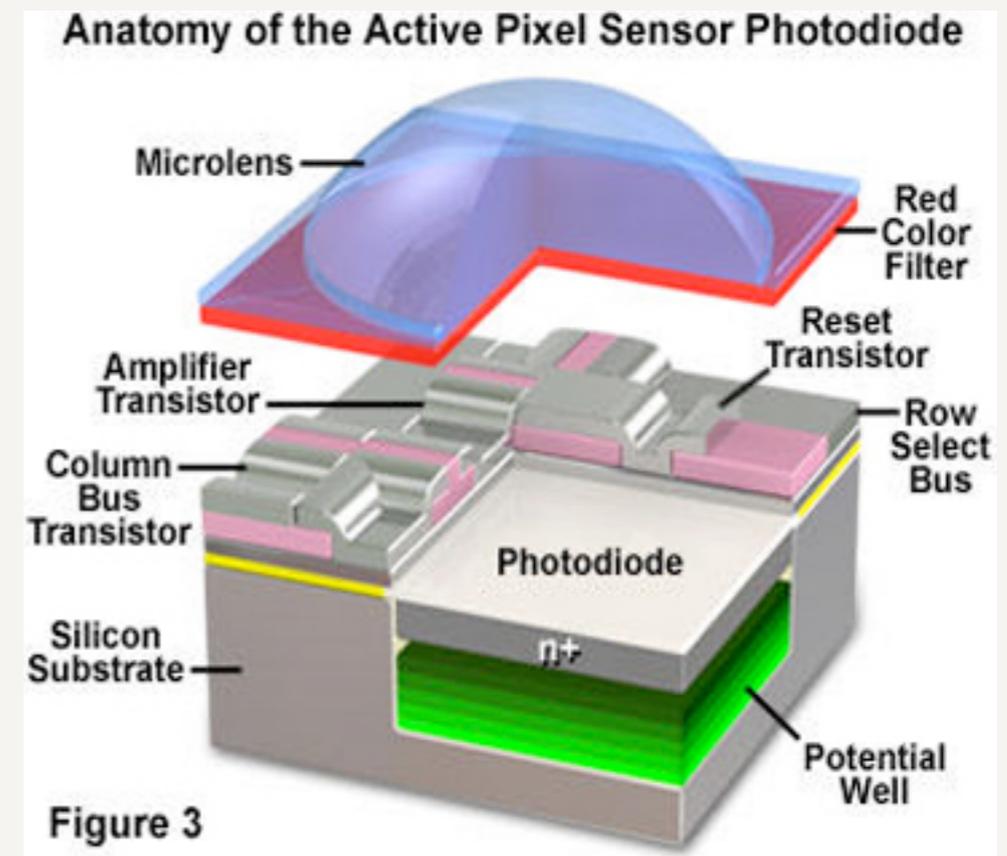
- **Füllfaktor:** Verhältnis der **photoaktiven** Fläche zur **Gesamtfläche** des Pixels



# Pixel

# Pixel

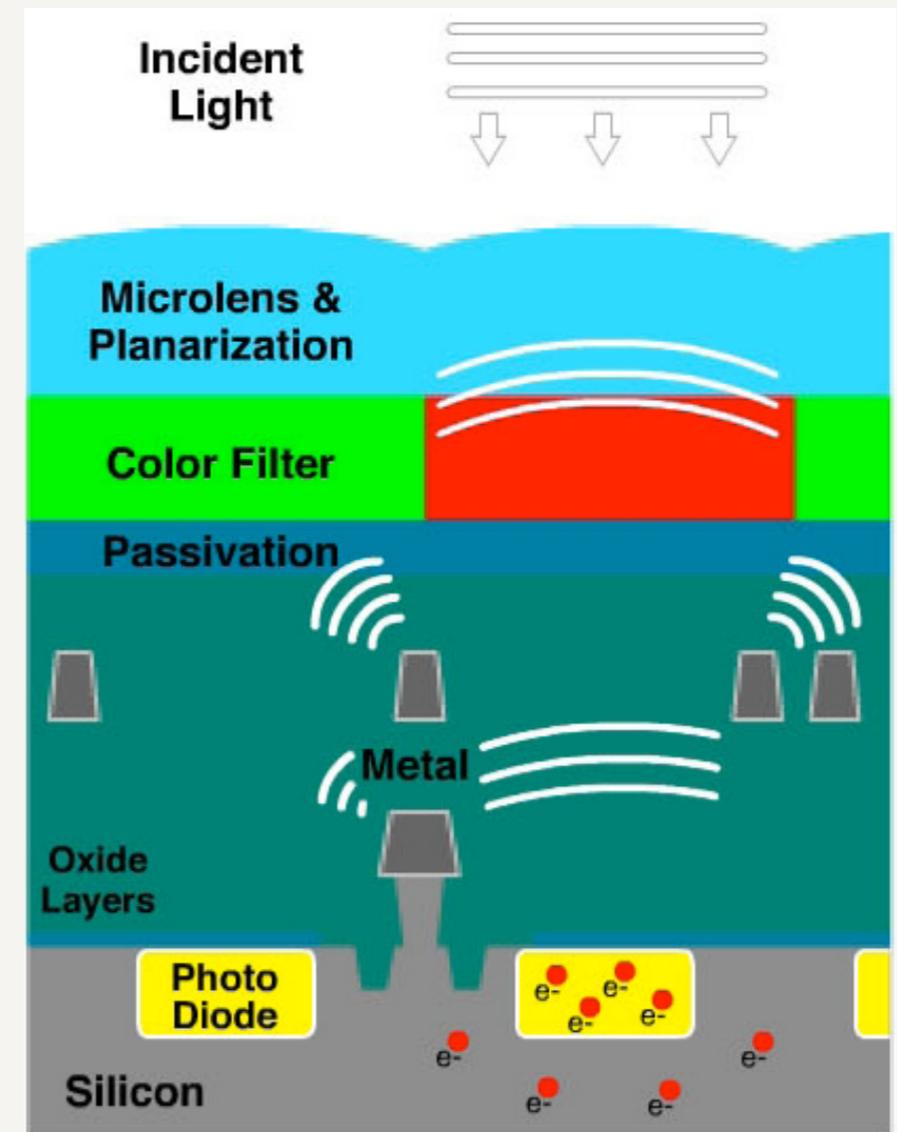
- Mikrolinsen um das Licht auf die photoaktive Fläche zu fokussieren
- Farbfilter für Farbsensoren (RGB)
- Elektronische Komponenten (3 Transistoren)
- Photodiode



Quelle: <http://www.ride-downhill.de/blog/?p=709>,  
bzw. [www2.informatik.hu-berlin.de](http://www2.informatik.hu-berlin.de)

# Optik

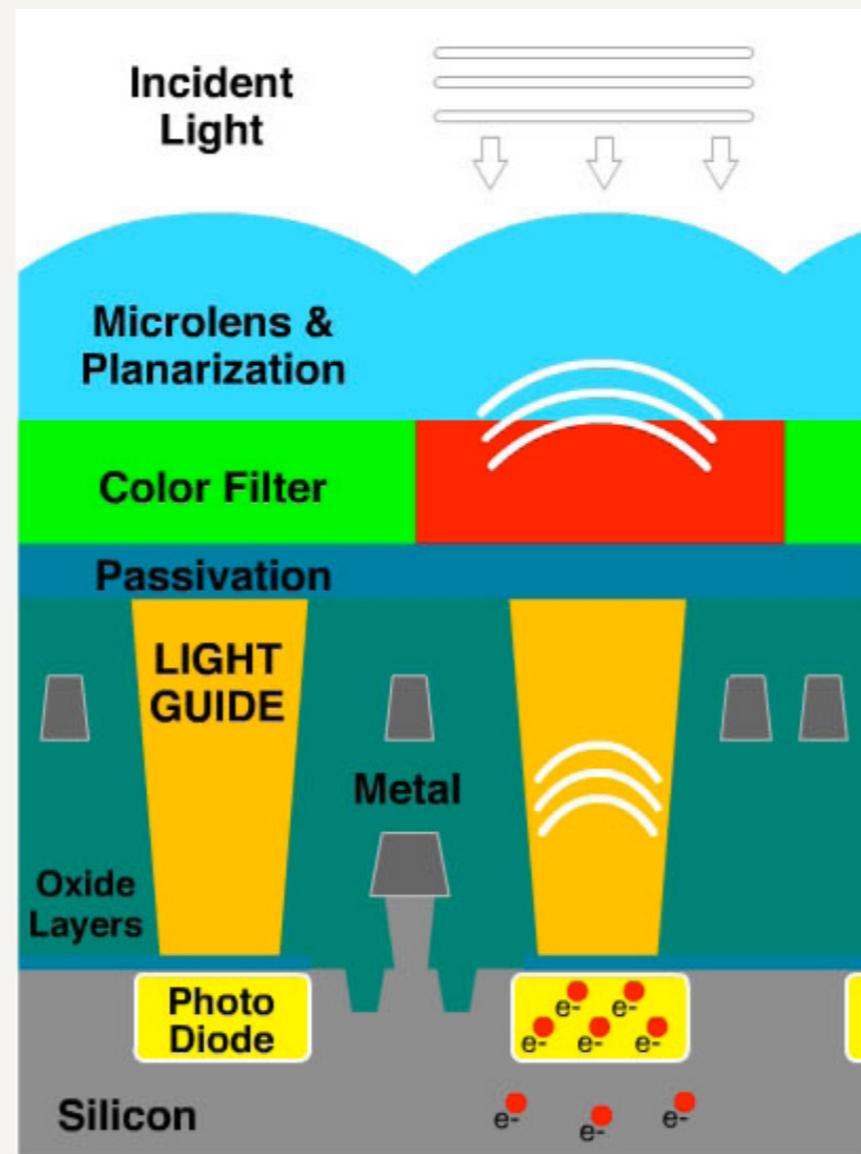
- Mikrolinsen um das Licht auf ein Pixel zu fokussieren
- Farbfilter für Farbsensoren (RGB): lässt nur Licht einer Farbe durch
- Elektronische Komponenten verursachen Streulicht, auch in benachbarte Pixel
- Auch von den Mikrolinsen kann Licht auf andere Pixel übersprechen



Quelle: [http://www.aptna.com/products/technology/aptna\\_a-pix.jsp](http://www.aptna.com/products/technology/aptna_a-pix.jsp)

# Lichtleiter

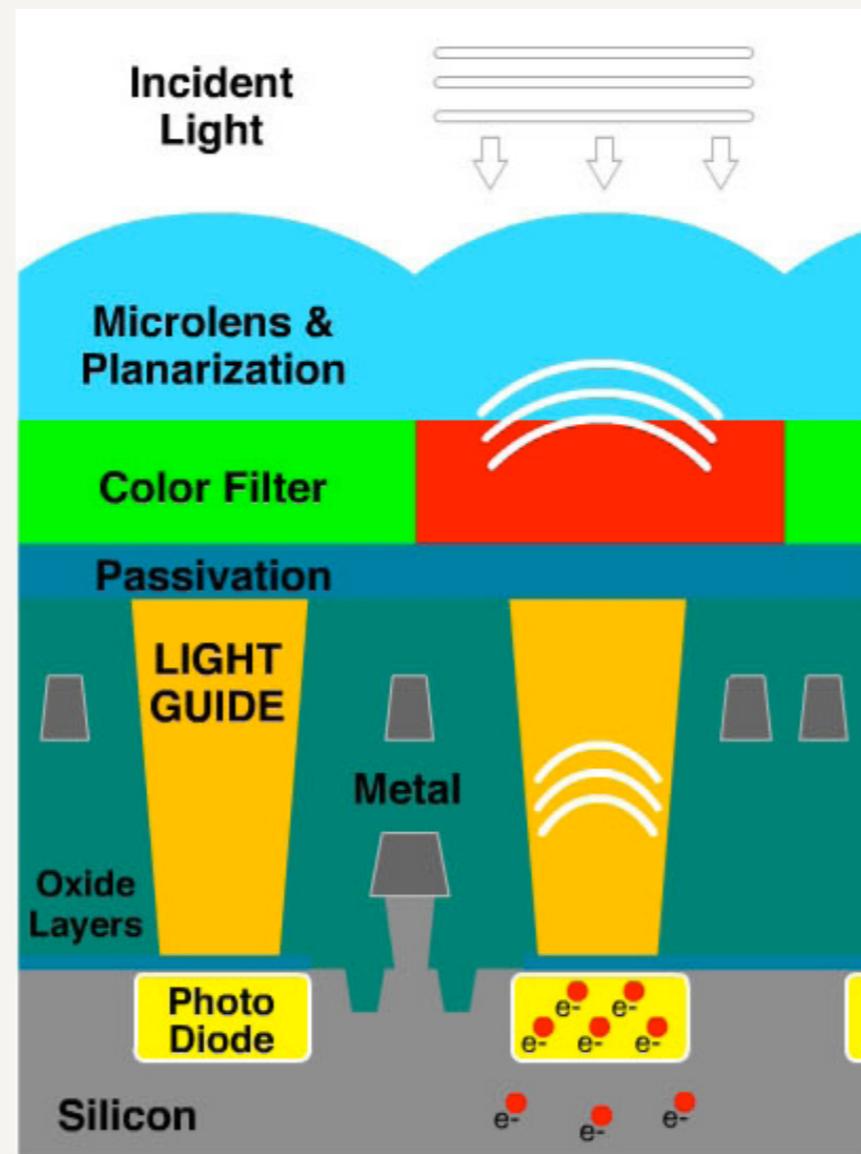
- Um das Streulicht zu reduzieren können Lichtleiter eingefügt werden.
- Fortgeschrittene Produktionstechnik



Quelle: [http://www.aptna.com/products/technology/aptna\\_a-pix.jsp](http://www.aptna.com/products/technology/aptna_a-pix.jsp)

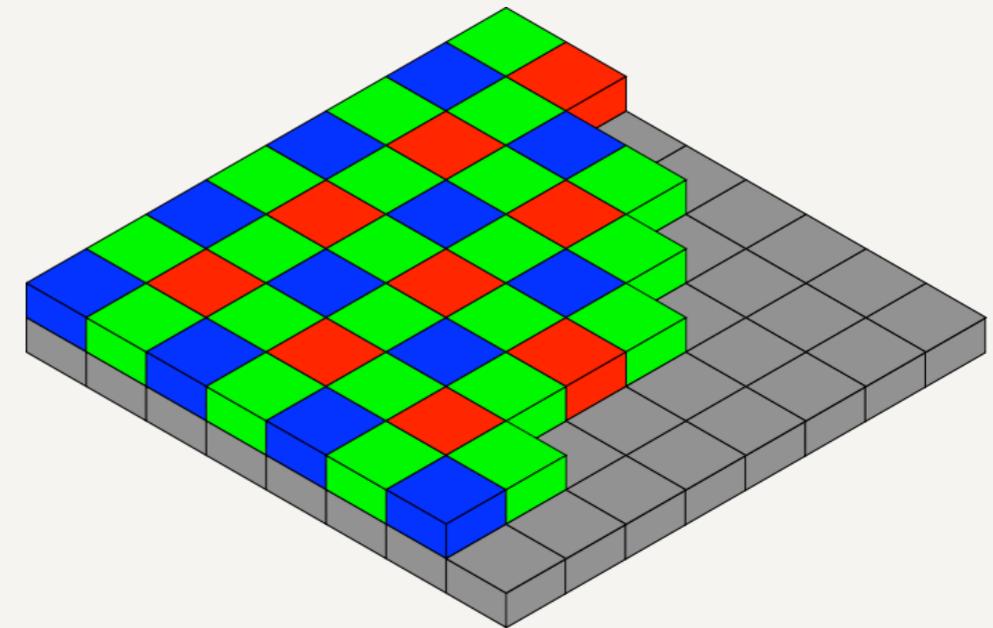
# Lichtleiter

- Mit welchem optischen Prinzip werden diese Light Guides wohl hergestellt?

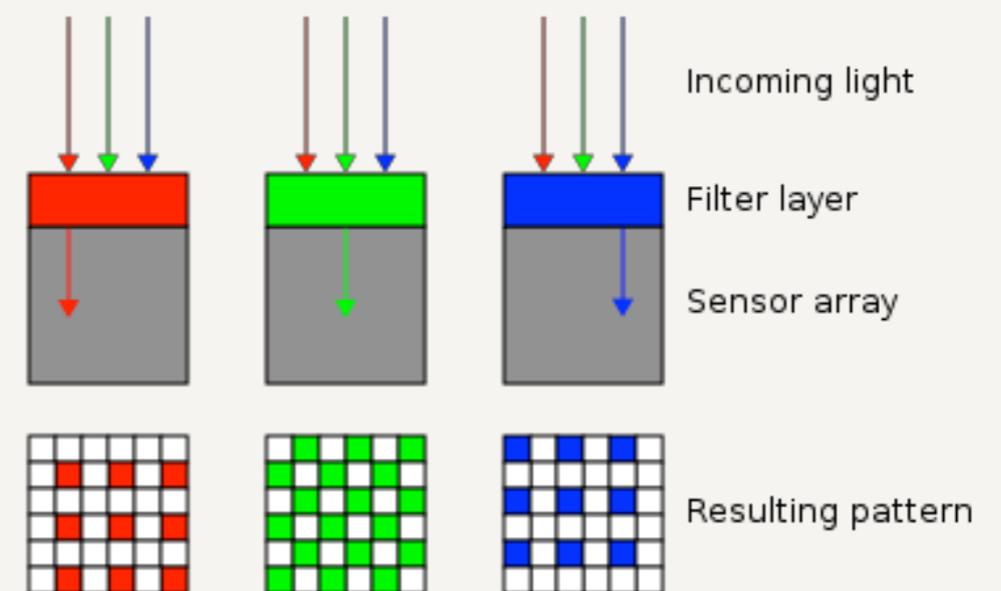


Quelle: [http://www.aptna.com/products/technology/aptna\\_a-pix.jsp](http://www.aptna.com/products/technology/aptna_a-pix.jsp)

# Farbfilter



- Bayer-Pattern
- 2x2 Substruktur R-G-G-B
- Grün ist doppelt gewichtet, weil das Auge im Grünen am empfindlichsten ist.

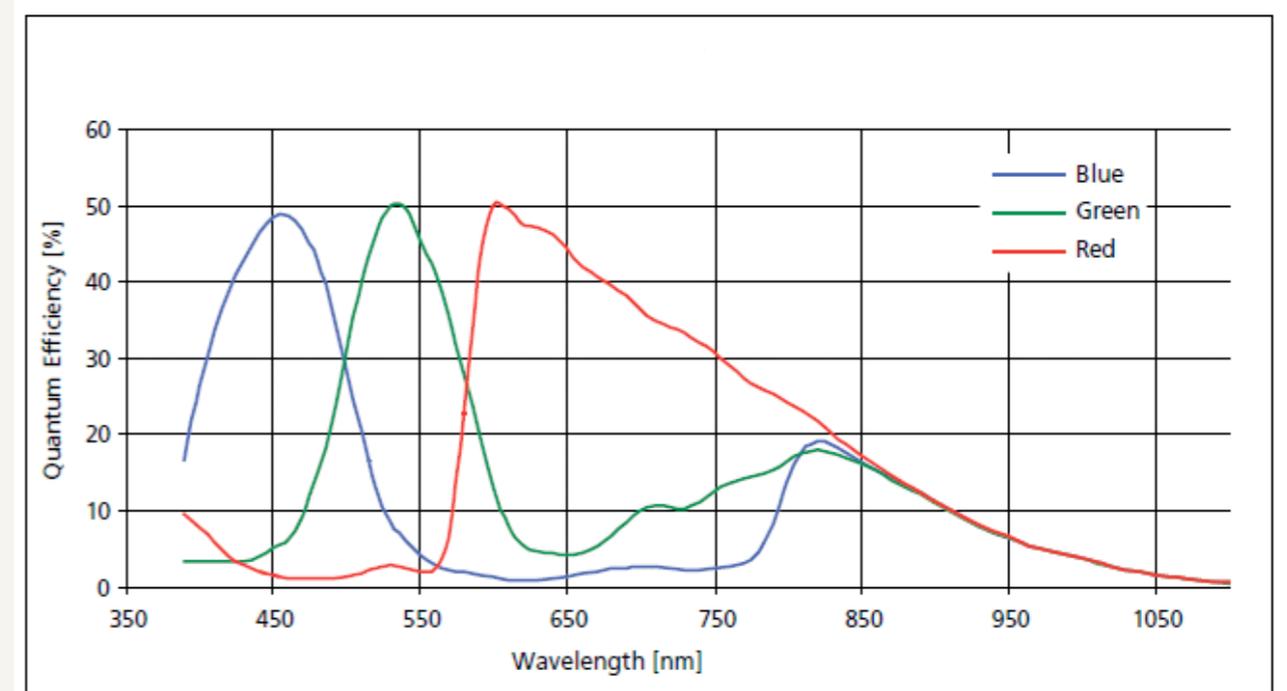


# Quanteneffizienz und Farbfilter

- Quanteneffizienz:

$$\eta = \frac{N_{\text{elektron}}}{N_{\text{photon}}}$$

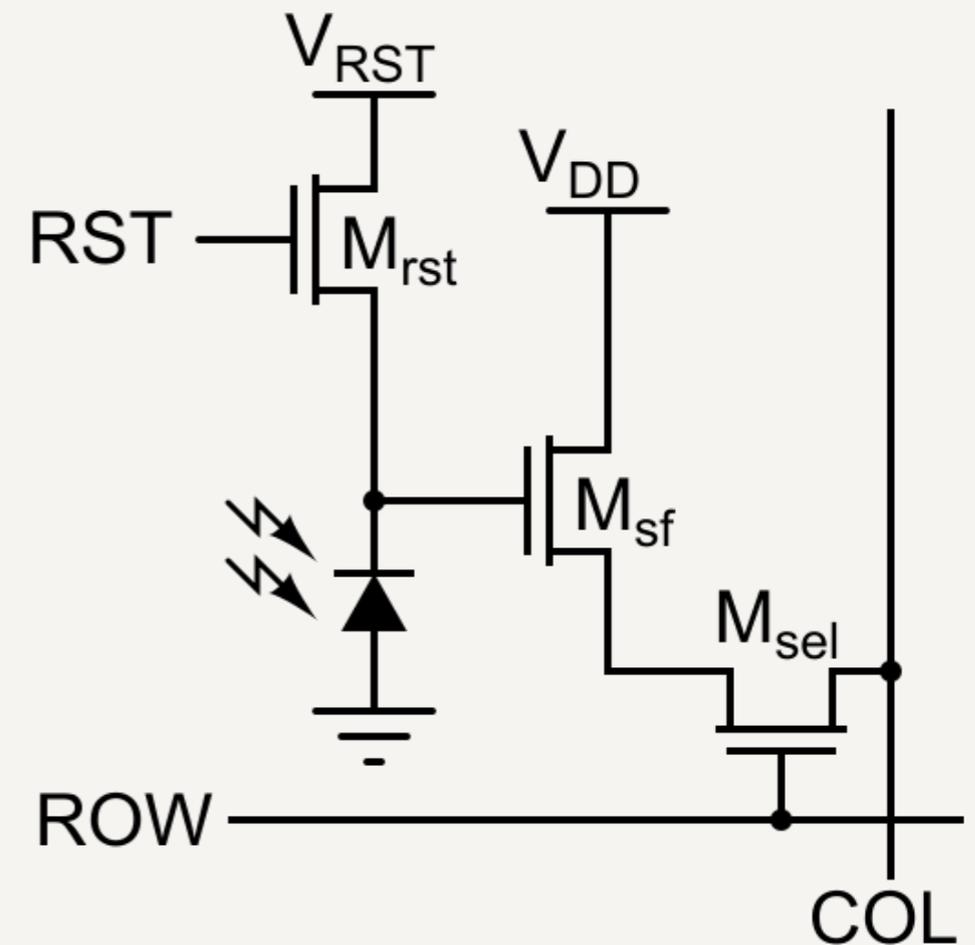
- Als Photonen-Anzahl  $N_{\text{photon}}$  wird das gesamte einfallende Licht **vor** der Optik gezählt.
- Die Farbfilter absorbieren gewissen Teile des Spektrums und reduzieren dort die QE.
- Die QE wird typischerweise durch Vergleich gegen einen bekannten Standard vermessen.



Quelle: <http://www.epixinc.com/products/sv035.htm>

# Pixel-Schaltung

- Photodiode in Sperrrichtung betrieben
- Aufladen der Sperrschicht (RLZ) der PD über Transistor  $M_{rst}$
- Entladen der Kapazität der Sperrschicht über Photostrom
- Verstärkung der resultierenden Spannung über Transistor  $M_{sf}$ . Verstärkungsfaktor von  $V_{DD}$  bestimmt
- Auslesen über Transistor  $M_{sel}$
- In Summe: aufgesammelte Ladung steuert die Spannung von  $V_{DD}$  zum ADC beim Auslesen.



# Ladungsmenge

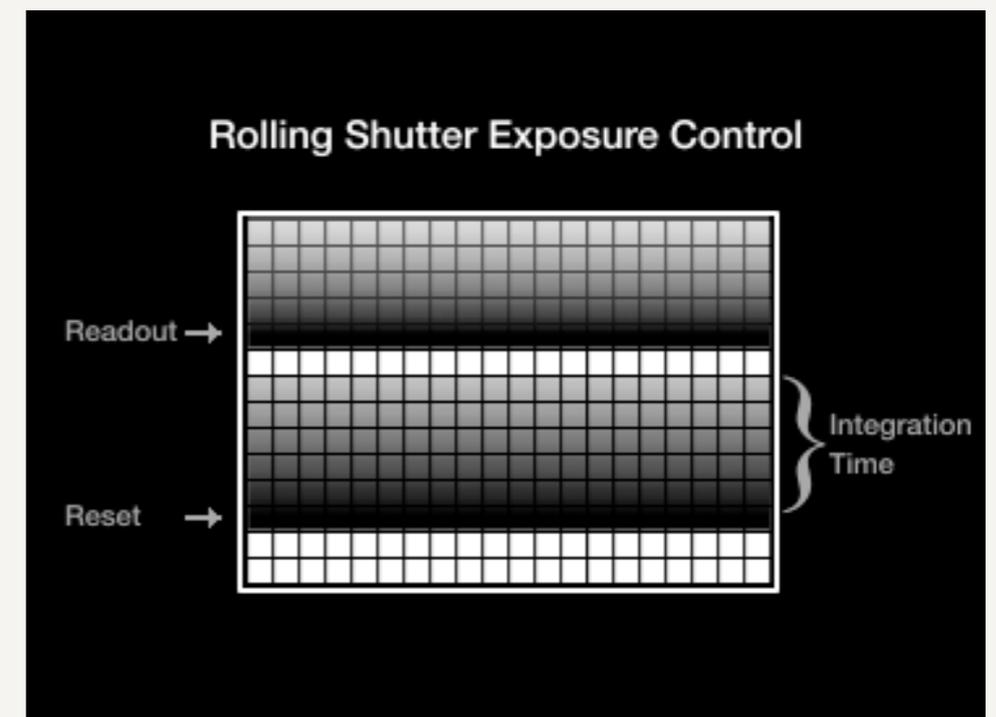
- Belichtungszeit vom Reset-Ende bis zum Auslesen
- Ladungsmenge linear zur Belichtungszeit
- Ladungsmenge linear zur Bestrahlungsstärke
- Ab einer gewissen Grenze Sättigung (PD vollständig entladen)
- Dunkelstrom erzeugt unerwünscht Ladungsträger
- Elektronen-Diffusion aus benachbarten Pixeln erzeugt unerwünschte Ladungsträger

# Bildwerte

# Rolling shutter und Global shutter

- **Rolling shutter** (üblich für CMOS)
  - ▶ Reset, Belichtung und Auslesen erfolgte pro Zeile.
  - ▶ Die drei Schritte ‚laufen‘ von oben bis unten durchs Bild.
  - ▶ Alle drei Schritte finden also gleichzeitig auf verschiedenen Zeilen statt.
- **Global shutter** (üblich für CCD)
  - ▶ Reset und Belichtung gleichzeitig auf allen Pixeln
  - ▶ Auslesen zeilenweise

Shutter ↓

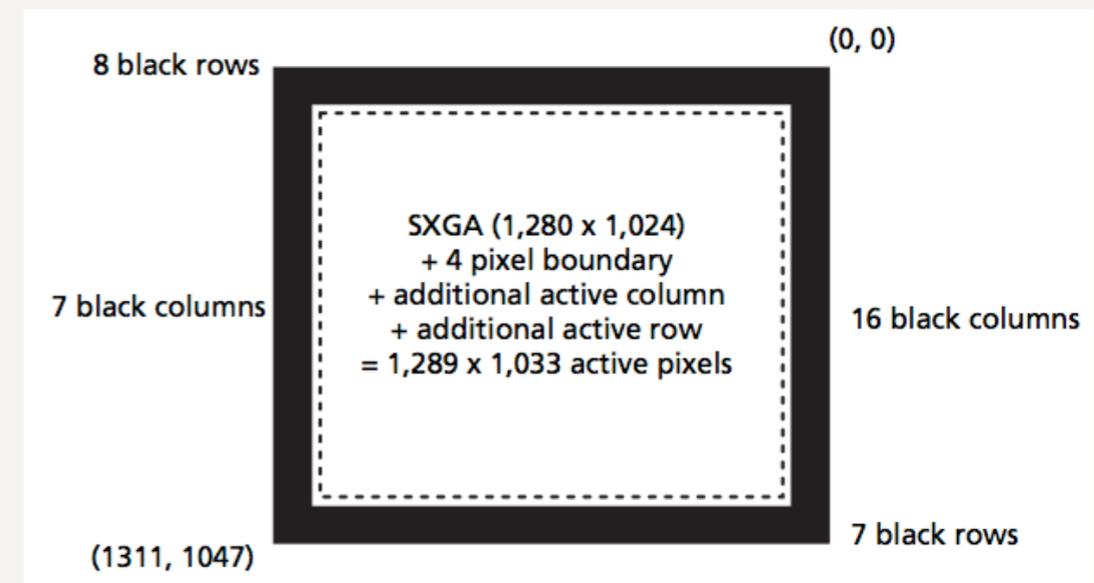


Aptina Shutter

# Schwarzwert-Korrektur

## Analog

- Der Dunkelstrom einer Photodiode ist stark von der Temperatur abhängig (s. OMA 03).
- Einige Pixel am Rand des Imagers sind abgedeckt (durch Metallisierung) und sehen kein Licht.
- Die resultierende Ladungsmenge ist für den Dunkelstrom repräsentativ.
- Daraus wird eine Dunkelstrom-Korrektur als Offset-Spannung am ADC generiert (*Black level calibration*)

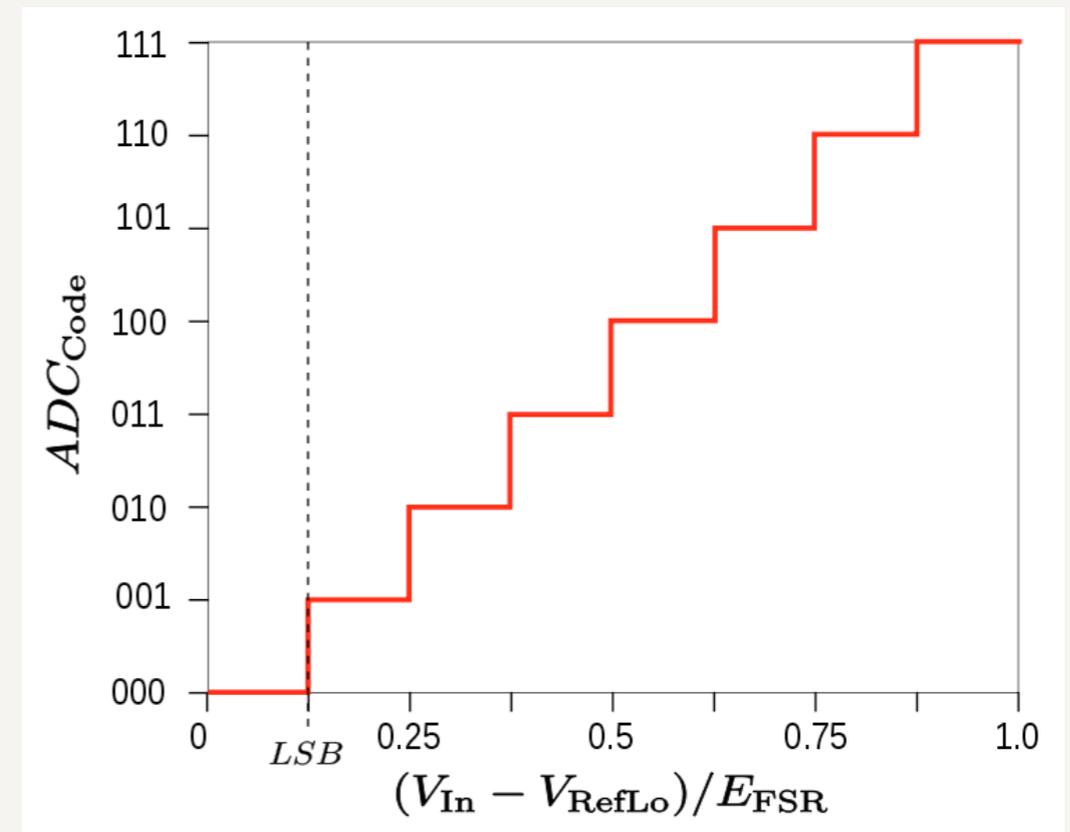


Quelle: [www.micron.com](http://www.micron.com)  
Datenblatt für den MT9M001

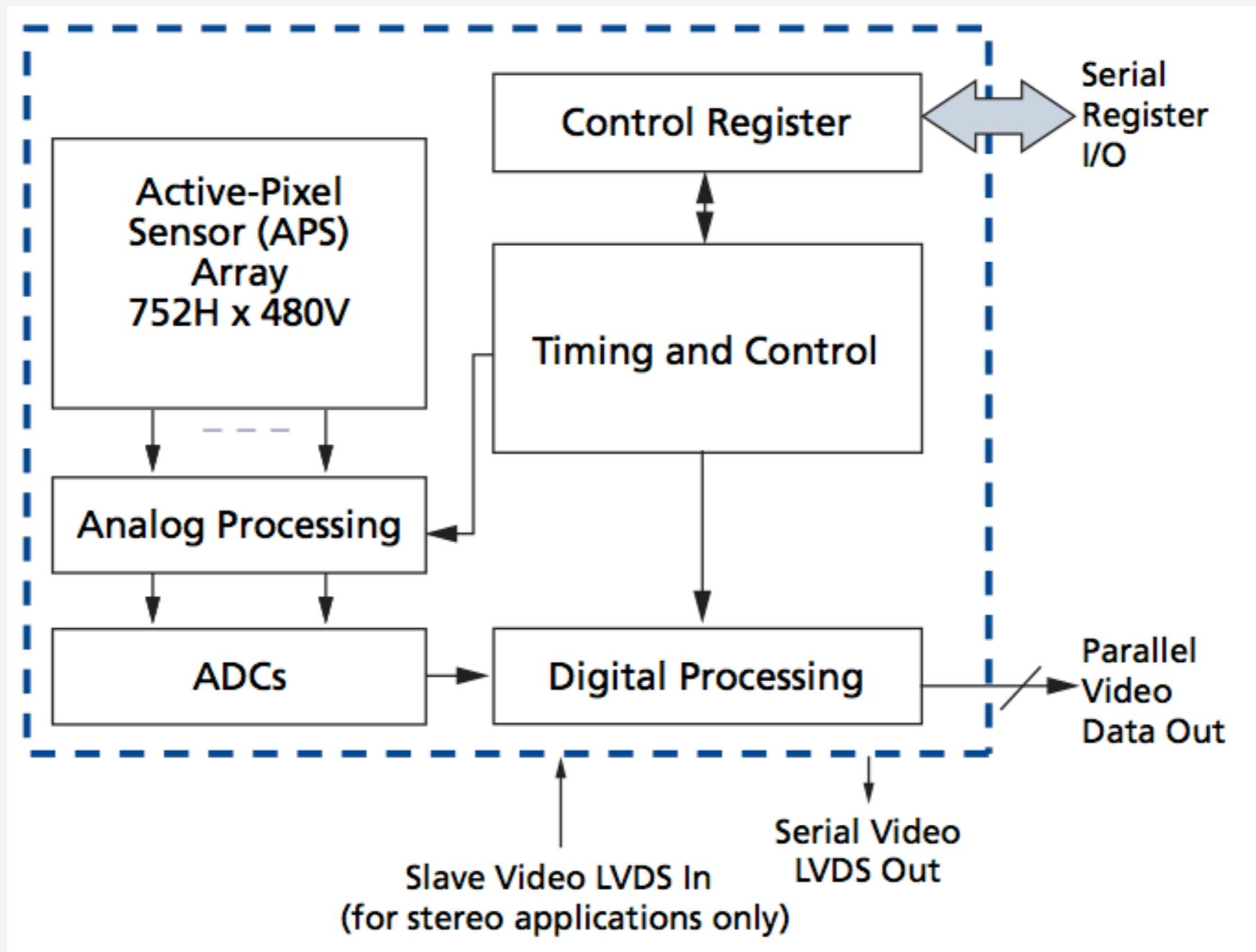
# Analog-Digital-Konvertierung

- Eingangsspannung  $V_{In}$
- Dunkel-Referenzspannung  $V_{RefLo}$
- Dynamik-Umfang  $E_{FSR}$
- (FSR = full scale range)

3bit Auflösung

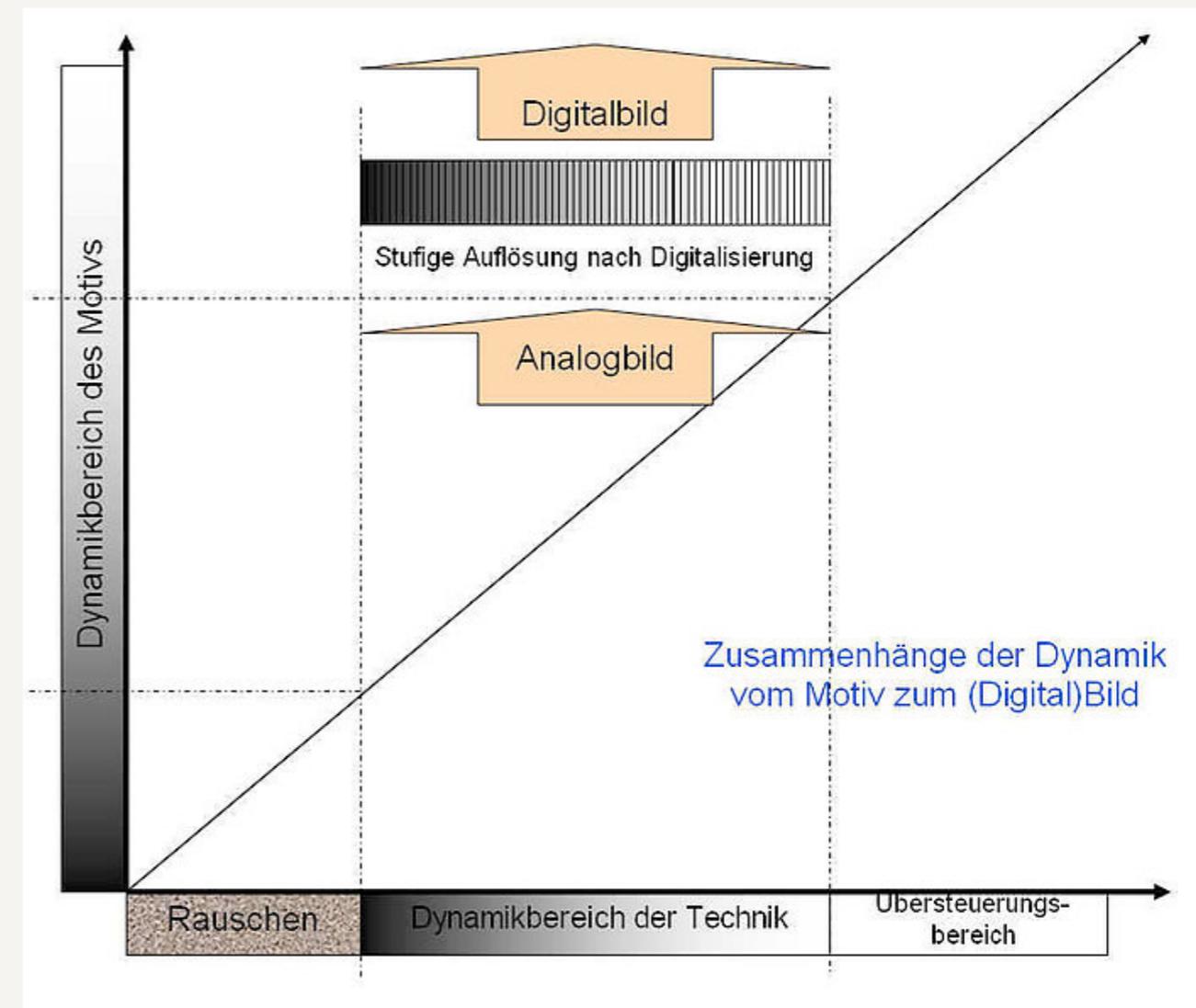


# Schematischer Überblick



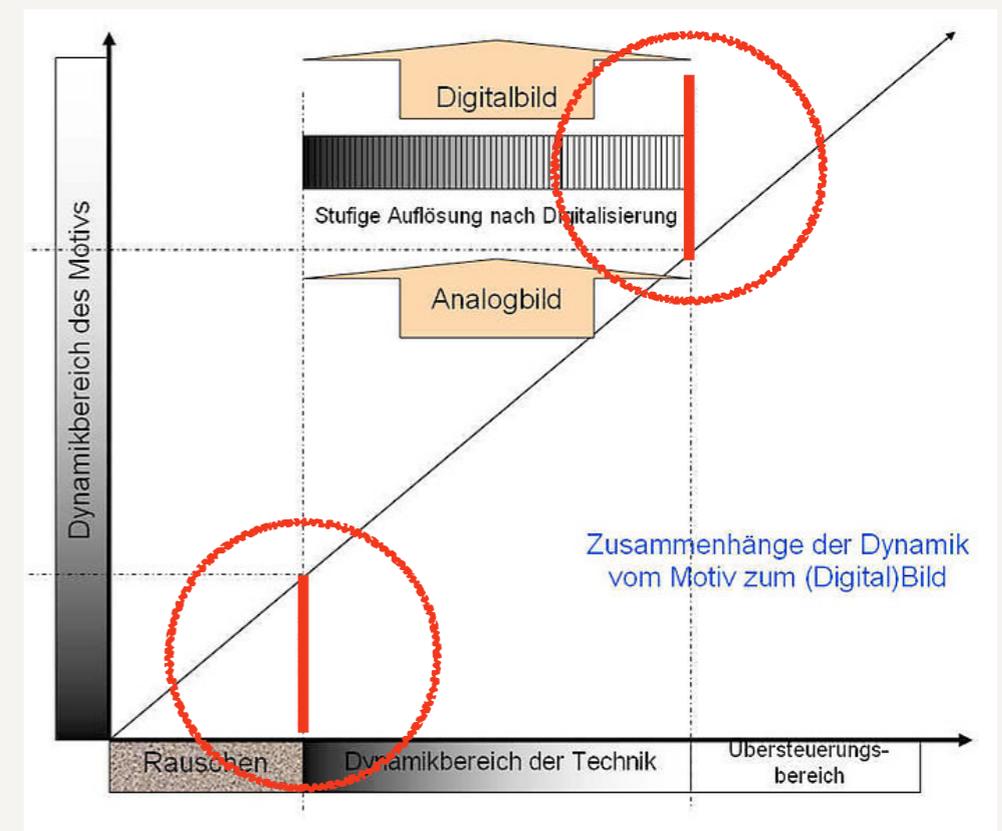
# Dynamik-Umfang

- **Dynamik-Umfang**  
(Dynamikbereich, Dynamik, Kontrast) ist das Verhältnis vom größten zum kleinsten Messwert
- Der kleinste Messwert kann grade noch vom Rauschen unterschieden werden.
- Typischerweise in Dezibel (db) angegeben.



# Clipping

- Der analoge Wert überschreitet die Grenzen der möglichen digitalen Codewerte.
- Positives Clipping (Überbelichtung): alle überbelichteten Pixel haben den höchsten digitalen Codewert.
- Negatives Clipping: der Analog-Wert ist kleiner als die Dunkel-Referenzspannung
- Sehr problematisch in der Bildverarbeitung: es kann überhaupt keine Aussage mehr über den wahren Helligkeitswert getroffen werden.



# HDR

# Signal-zu-Rauschen (SNR)

- Verhältnis der Signalleistung zur Rauschleistung
- Typischerweise in Dezibel angegeben (dB)
- Alternativ: Verhältnis Signal zur Breite des Rauschens

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \\ &= \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rauschen}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= 10 \log \left( \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \right) \text{ dB} \\ &= 10 \log \left( \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rauschen}}} \right) \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{\text{Signalamplitude}}{\text{Rausch-Standardabweichung}} \\ &= \frac{A_{\text{Signal}}}{\sigma_{\text{Rauschen}}} \end{aligned}$$

# Low Dynamic Range (LDR)

- Dynamik-Umfang der Realität  
üblich 10.000 : 1 oder 80dB
- Mit direkten Lichtquellen  
oder starken Kontrasten im  
Bild auch mehr
- Normales Bild: 8bit  
Helligkeitsstufen = 255 :  
1 oder 48dB
- Es kommt zu Clipping (Über-  
und Unterbelichtung)



[http://fotowelt.chip.de/k/reisen-architektur/deutschland/altstadt\\_duesseldorf\\_hdr/365177/](http://fotowelt.chip.de/k/reisen-architektur/deutschland/altstadt_duesseldorf_hdr/365177/)

# High Dynamic Range (HDR)

- Bei HDR-Bildern wird der Dynamik-Umfang durch verschiedene Techniken erweitert.
- Zur Darstellung auf unterschiedlichen Anzeigegeräten (Bildschirm, Projektor, Ausdruck) muss die hohe Dynamik auf eine niedrige Dynamik abgebildet werden.
- Dieser Prozess heißt *(local) tone mapping*.



<http://www.hilger-berlin.de/public/dri/>

# HDR-Modus I

## Analog I: Belichtungszeitreihe

- Aufnahme mehrerer Bilder mit unterschiedlicher Belichtungszeit

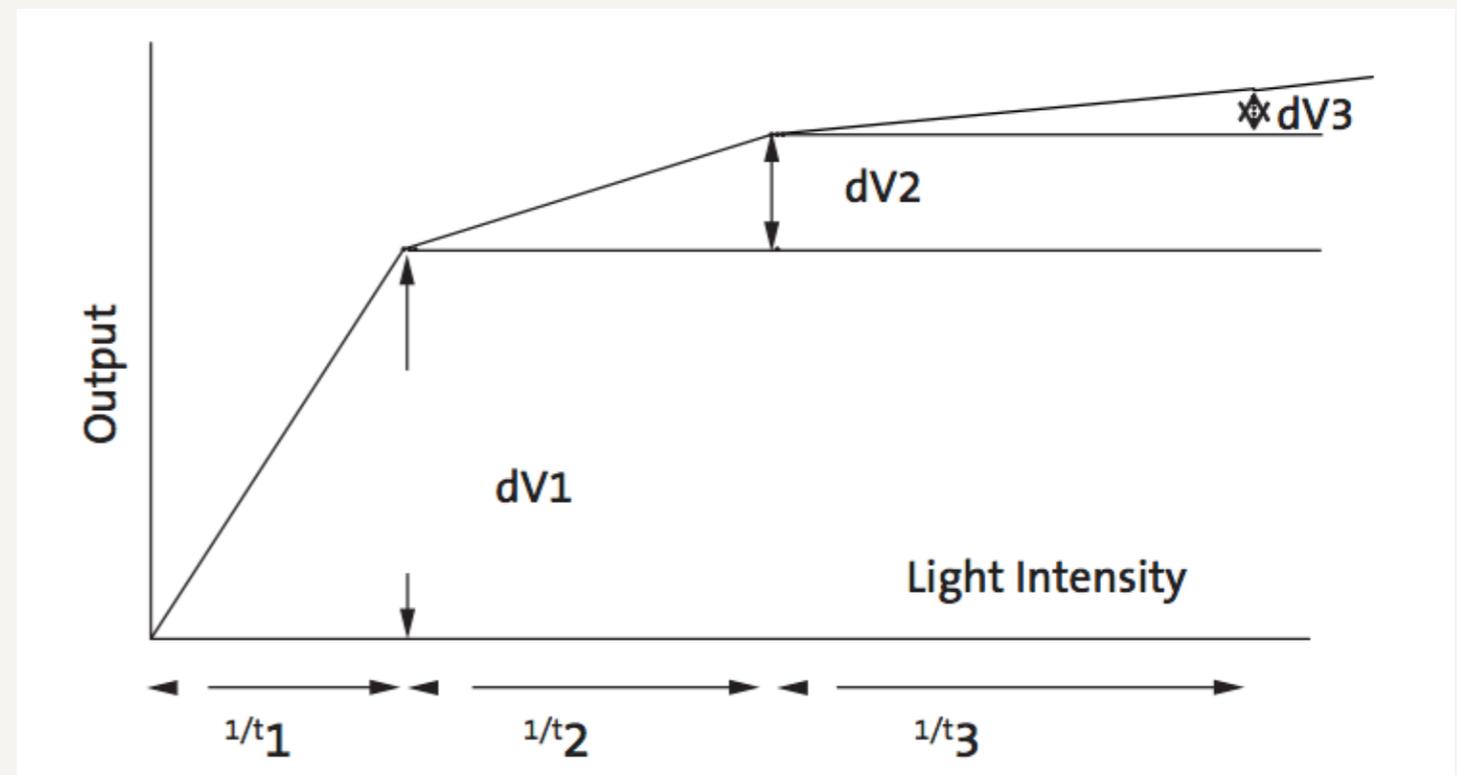
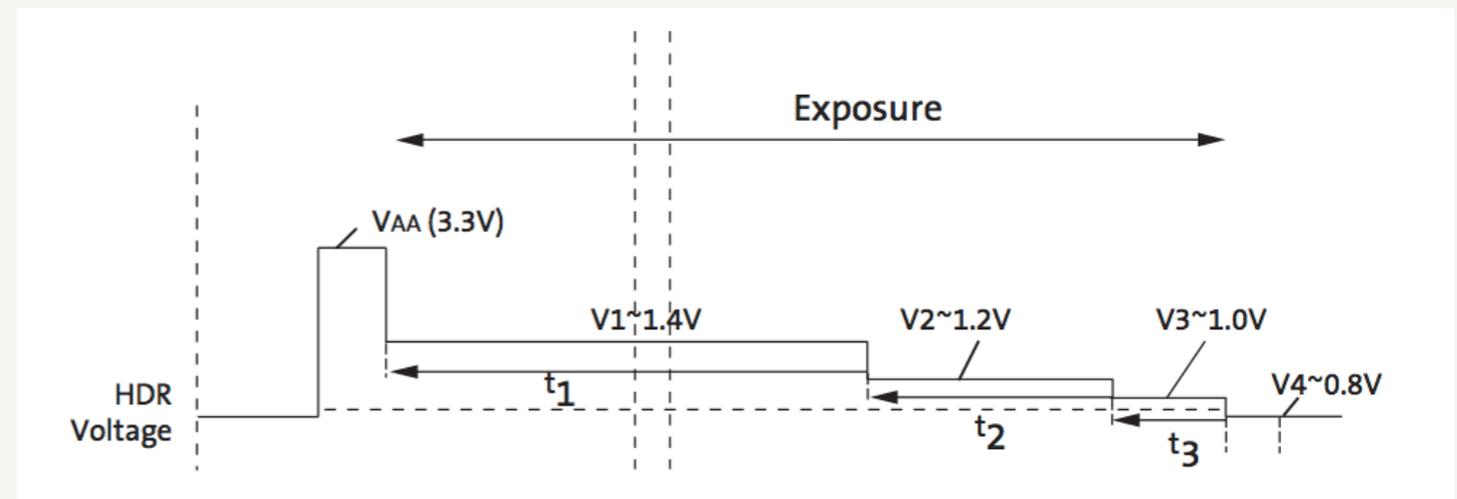


Beispiel: Kombination dreier Belichtungszeiten

# HDR-Modus II

## Analog II: Geknickte Kennlinie

- HDR: high dynamic range
- Ändern der Reset-Spannung während der Belichtungszeit
- Eine stückweise lineare geknickte Kennlinie entsteht
- SNR geht zurück, Dynamik-Umfang steigt an



Quelle: [www.aptna.com](http://www.aptna.com) Datenblatt zum MT9V032

# HDR-Modus III

## Digital: Tone Mapping

[https://de.wikipedia.org/wiki/Tone\\_Mapping](https://de.wikipedia.org/wiki/Tone_Mapping)

- Im allgemeinen: jede Abbildung des hohen Dynamik-Umfangs des HDR-Bildes auf das LDR-Bild
- Kann als Datenkomprimierung betrachtet werden (z.B. 12bit auf 8bit)
- Zwei Gruppen: *globales* oder *lokales* Tone Mapping



Vier verschiedene Tone Mapping Algorithmen

# HDR-Modus III

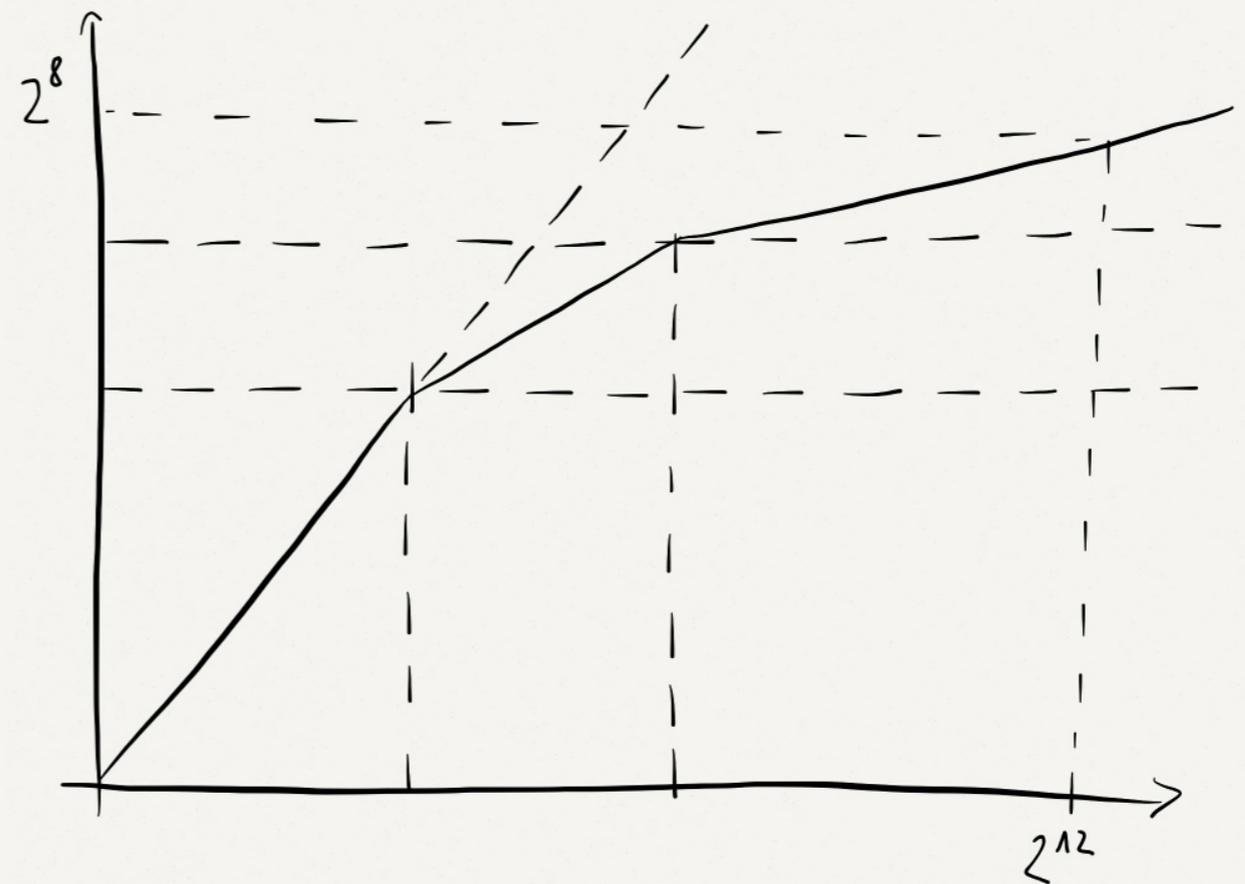
## Digital: Tone Mapping

- Beispiel 1: Simpler globaler Algorithmus, angelehnt an die Sinnesphysiologie:

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{in}} + 1}$$

- Beispiel 2: Stückweise lineare Kennlinie (s. Skizze)

Digitaler Code (LDR)

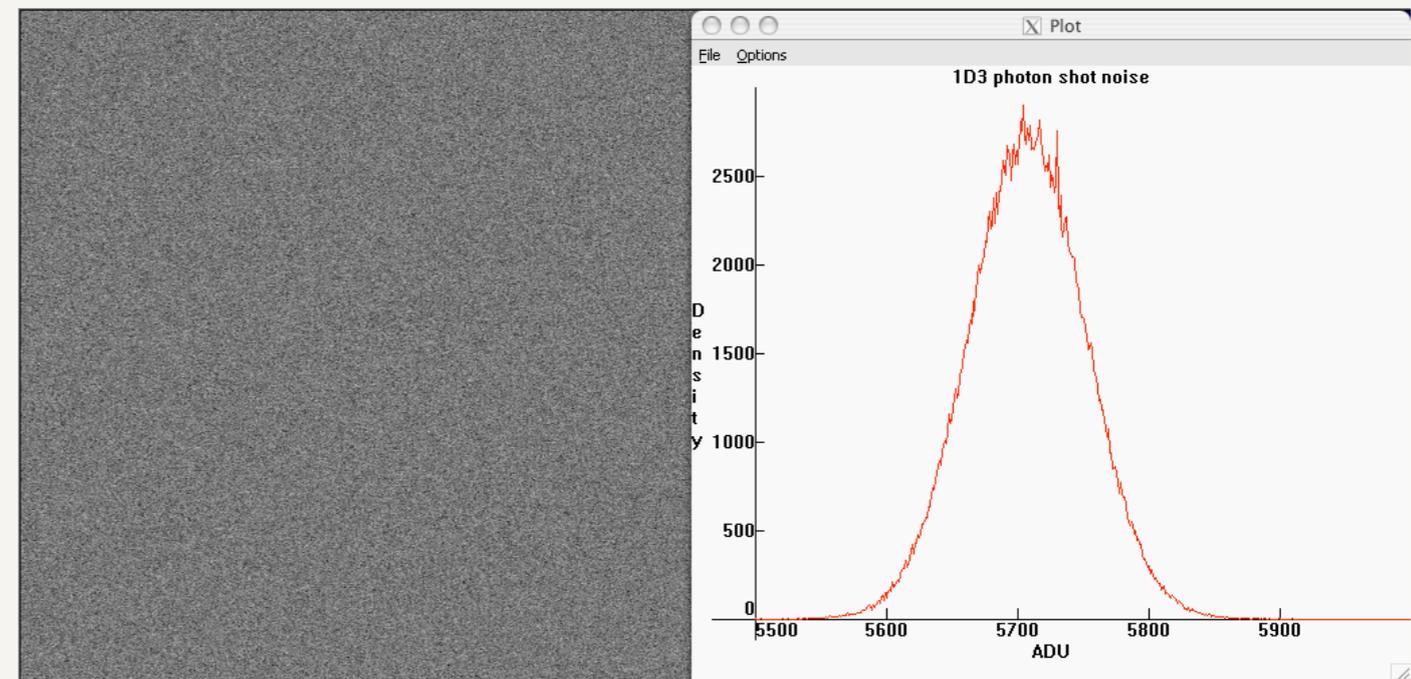


Digitaler Code (HDR)

# Rauschen

# Rauschen

- Zwei Kategorien: zeitliches und räumliches Rauschen
- Räumliches Rauschen: alles Rauschen was nach zeitlicher Mittelung bestehen bleibt.
- Hauptquellen:
  - ▶ Schrot-Rauschen (shot noise)
  - ▶ Ausleserauschen
  - ▶ Fixed-Pattern-Noise (FPN)
  - ▶ Thermisches Rauschen
  - ▶ Quantisierungsrauschen



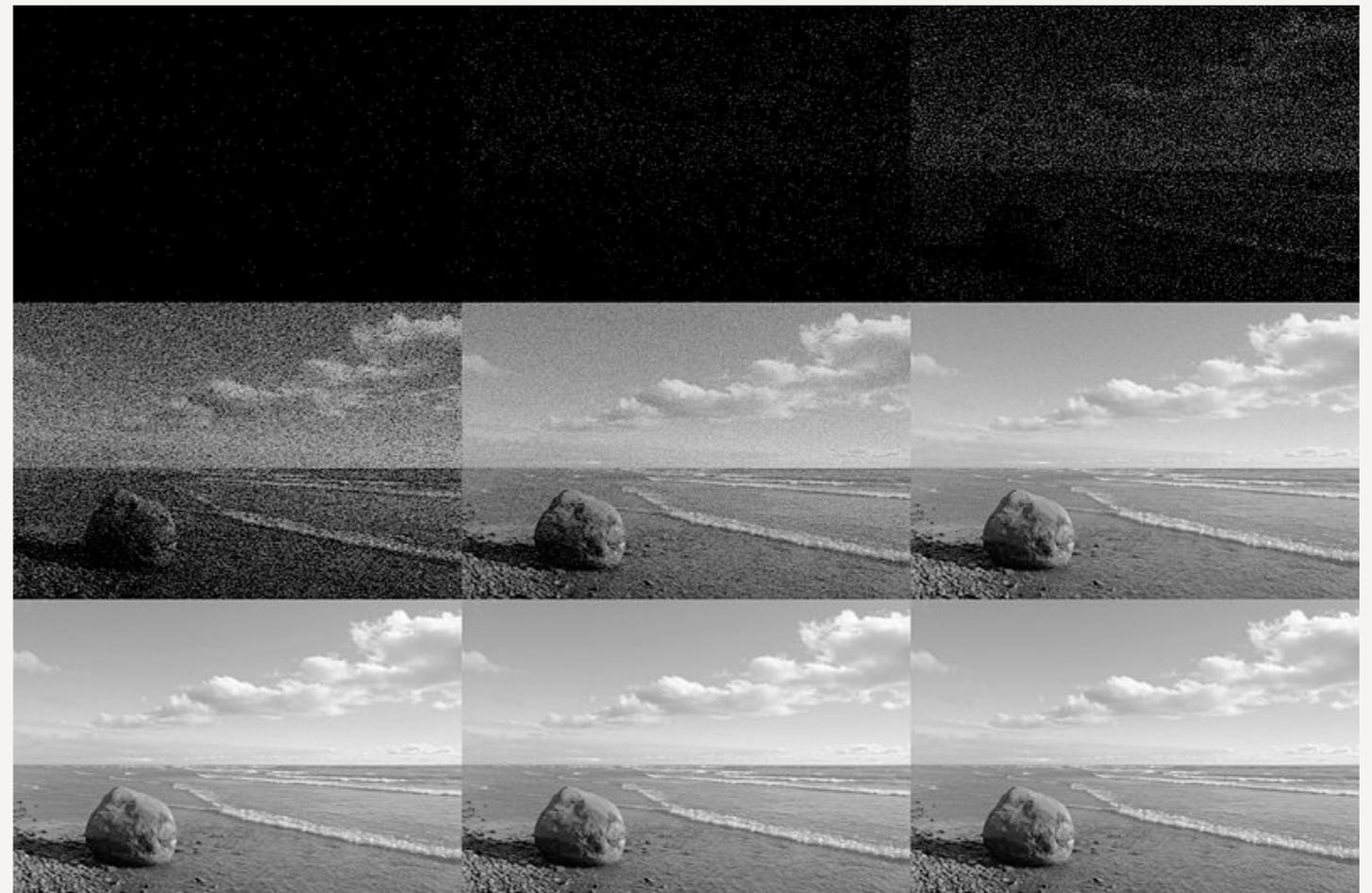
# Optik

## Schrot-Rauschen

- Grundlegende Eigenschaft von Licht: die Intensität schwankt mit

$$\sqrt{N}$$

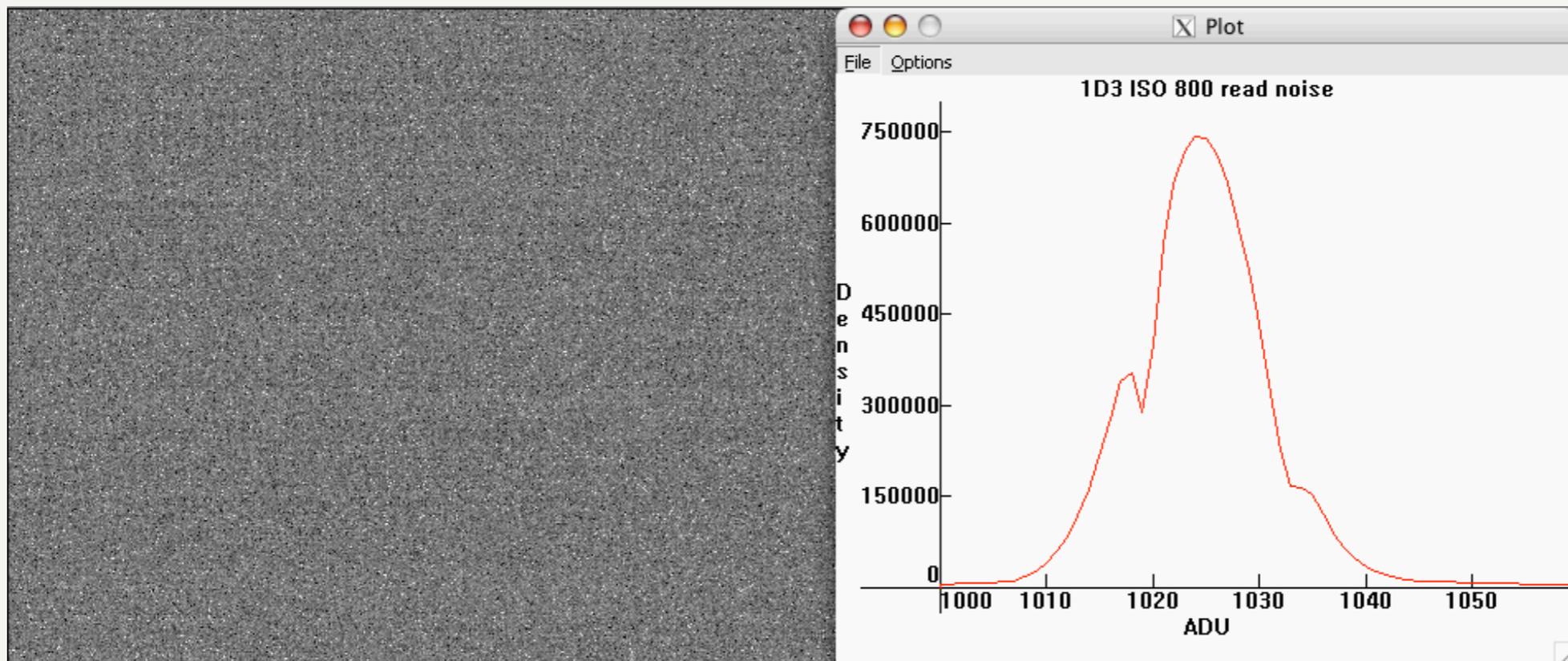
- Grund: die Anzahl der Photonen folgt einer Poisson-Verteilung
- SNR ist entsprechend auch  $\sqrt{N}$ , d.h. bei dunklen Bildern stark ausgeprägt.



# Auslesen

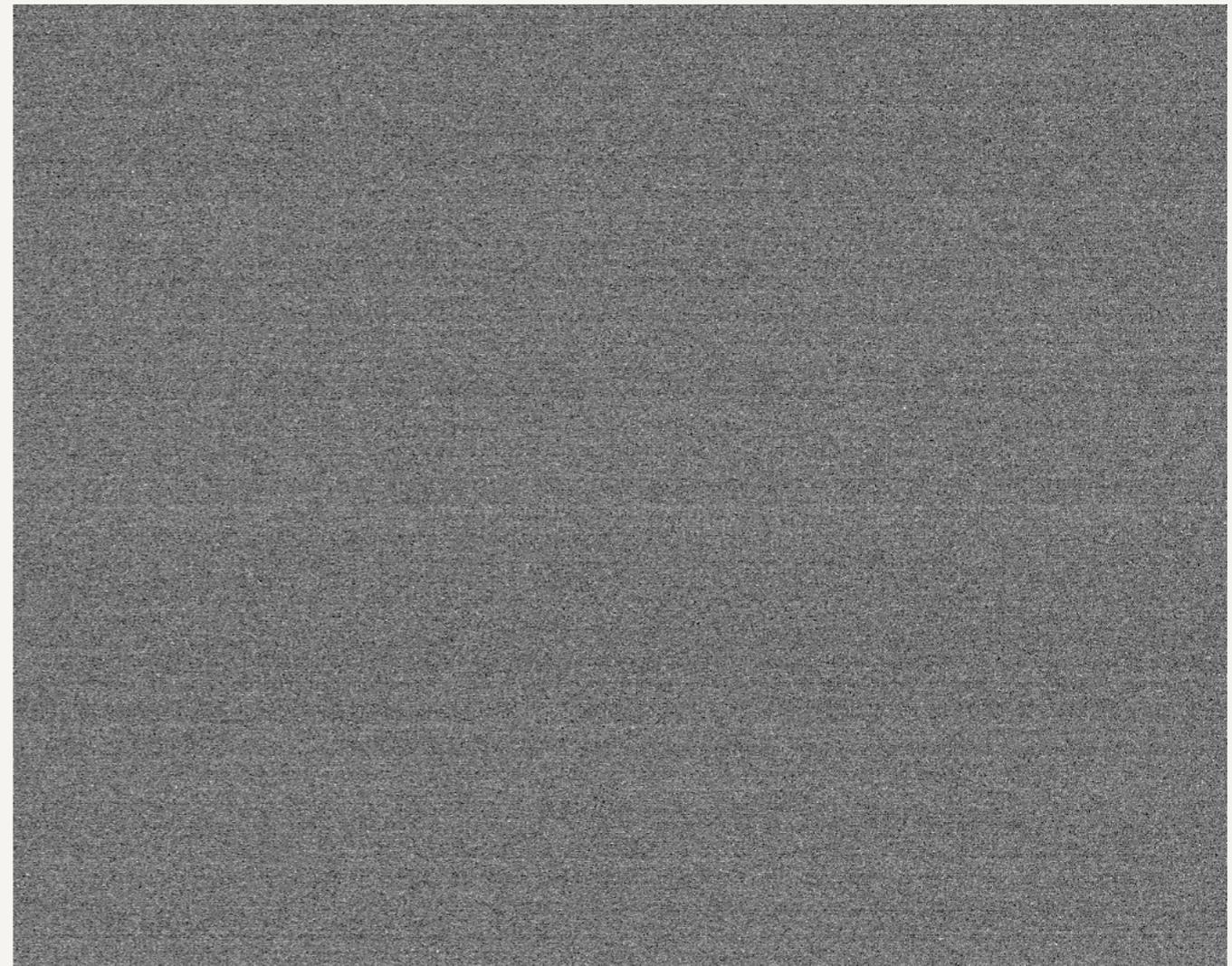
## Ausleserauschen

- Spannungsfluktuationen an allen Komponenten (Photodiode, Verstärker-Schaltung, ADC) führen zu zeitlichem Rauschen
- Gauß'sches Rauschen



# Fixed-Pattern-Noise

- Fixed-Pattern-Noise
  - Bauteiltoleranz ADC
  - Bauteiltoleranz Einzelpixel
- Empfindlich von Temperatur, Verstärkung und Belichtungszeit abhängig
- Kann durch Subtraktion mehrerer gemittelter Dunkelbilder reduziert werden.



Quelle: <http://theory.uchicago.edu/~ejm/pix/20d/tests/noise/>

# Thermisches Rauschen

## Johnson-Nyquist-Rauschen

- In Halbleitern kann die thermische Energie eines Elektrons ausreichend sein für die Anregung ins Leitungsband.
- In der Photodiode ist dies nicht von Photo-Elektronen zu unterscheiden.
- Dieses Rauschen ist stark temperaturabhängig.
- Es ist zeitlich einigermaßen konstant, und erhöht sich entsprechend mit der Belichtungszeit.

# Quantisierungsrauschen

- Die Eingangsgröße (Spannung) ist eine kontinuierliche Messgröße.
- Die Ausgabewerte sind aber diskret.
- Die auftretenden Rundungsfehler werden als Quantisierungsrauschen bezeichnet.

