

13 Grundlagen optischer Detektoren

13.1 Überblick Detektoren

13.2 Pixeldetektoren & Optik

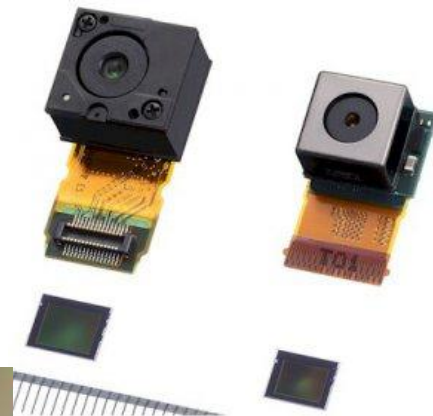
13.3 Detektoreigenschaften

(Licht)-Detektoren - Motivation

Art, Größe und Auflösung von optischen Detektoren beeinflussen massiv die Anforderungen an das optische System

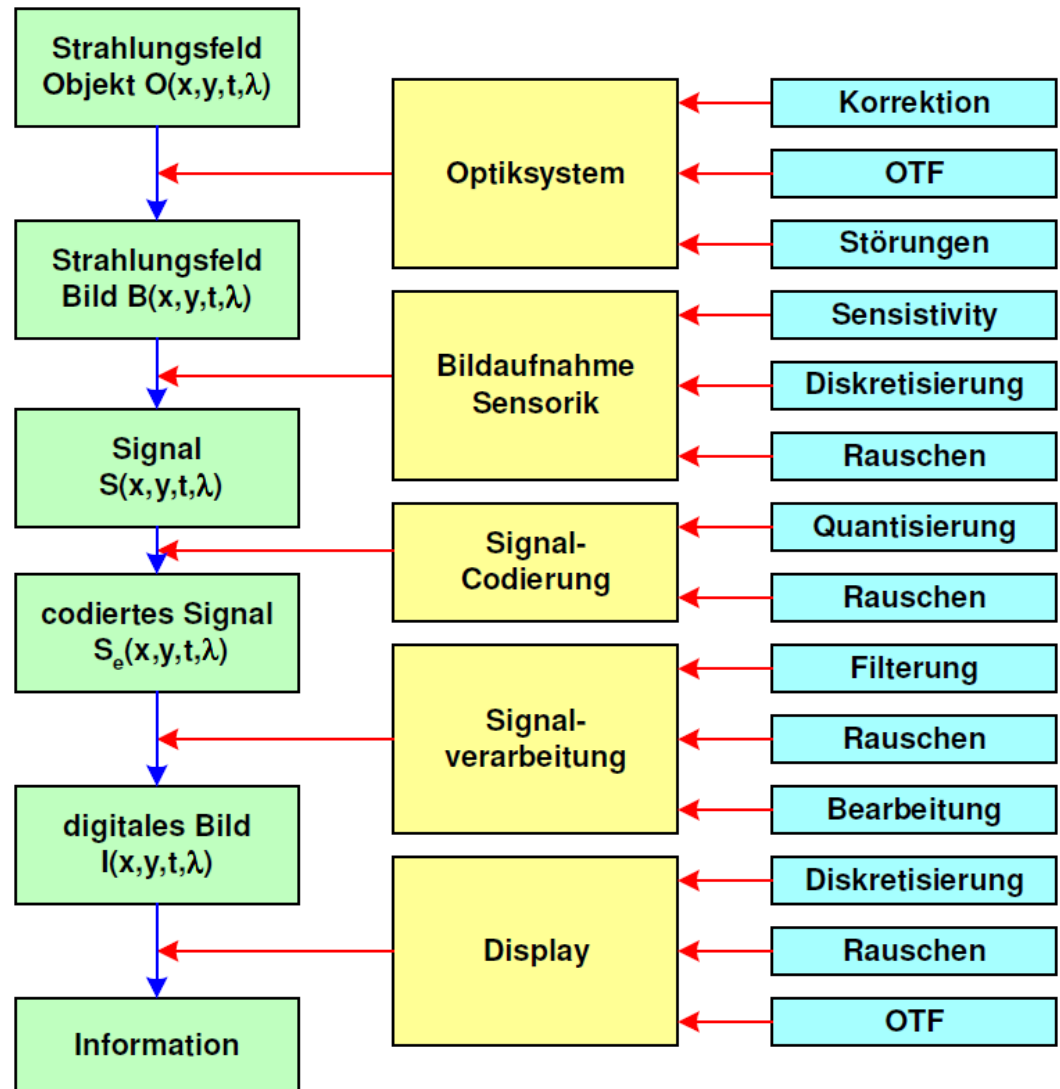


12Megapixel
-Kamera
(Quelle: Sony)



www.techfever.net

Komplette Signalkette Bilderfassung & Wiedergabe



Quelle: H.Gross: Optical Systems

13 Grundlagen optischer Detektoren

13.1 Überblick Detektoren

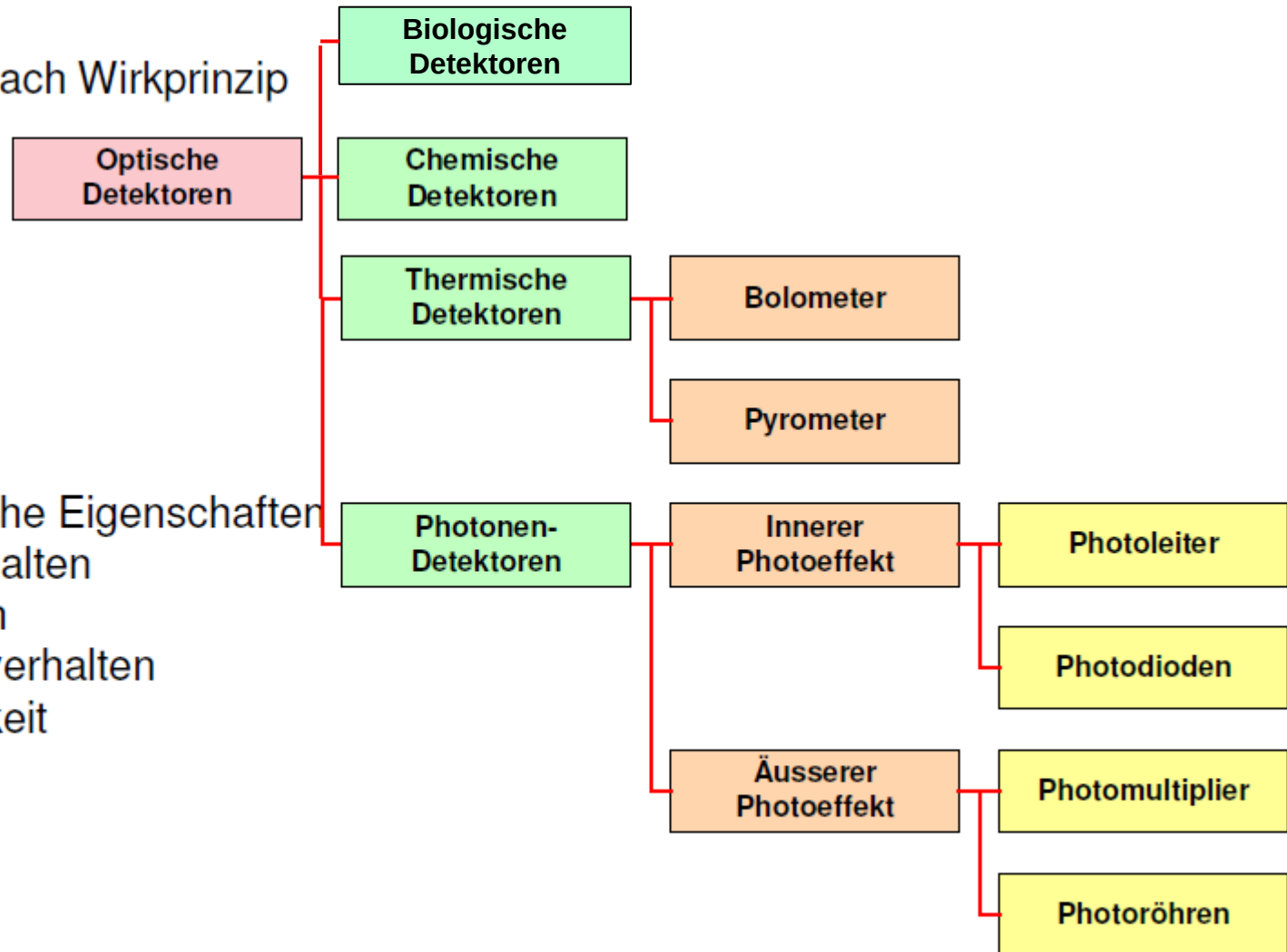
13.2 Pixeldetektoren & Optik

13.3 Detektoreigenschaften

(Licht)-Detektoren - Überblick



- Einteilung je nach Wirkprinzip



- Unterschiedliche Eigenschaften
 - Spektralverhalten
 - Zeitverhalten
 - Temperaturverhalten
 - Empfindlichkeit

Quelle: H.Gross: Optical Systems

Biologische Detektoren

- Auge
- Haut (Wärme)



Chemische Detektoren

- Fotografischer Film
- Röntgenplatten



Bild: Wikimedia – User:KMJ

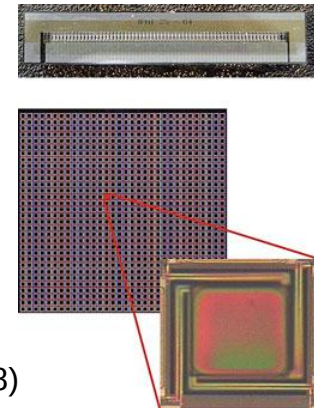
Photonen Detektoren (Quantendetektoren)

- Photodioden
- CCD
- CMOS



Thermische Detektoren

- Bolometer (IR-Detektoren)
- Thermopiles



www.photonik.de (2008)

Menschliches Auge



Springspinne - Polarisation

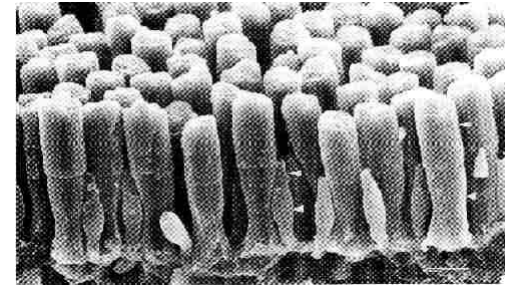
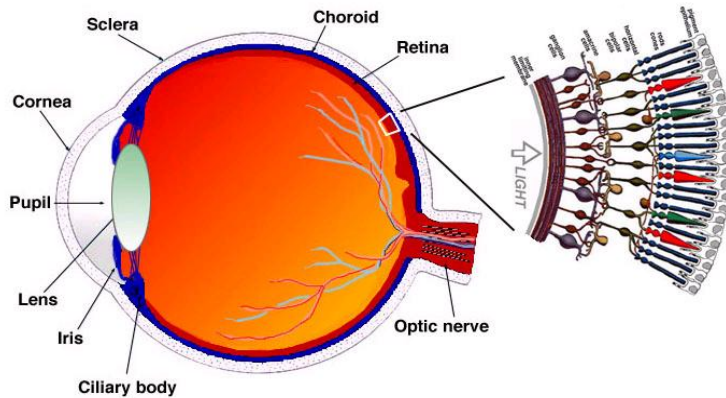


Facettenauge



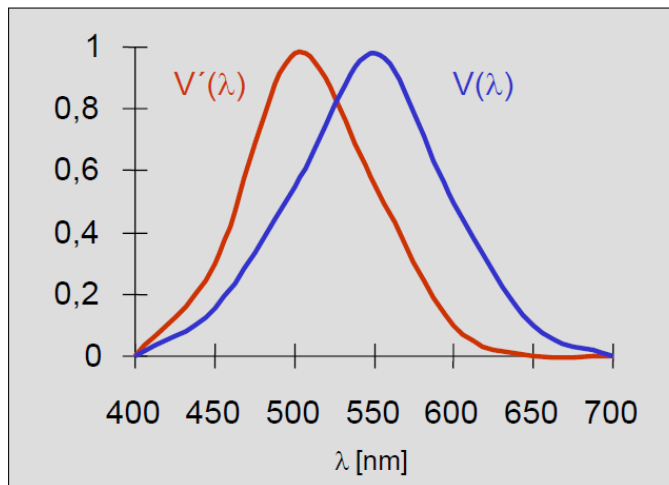
Bild: Wikimedia – User: Richard Bartz

Das Auge als Detektor



Zapfen und Stäbchen
Abstand ca. $5\mu\text{m}$

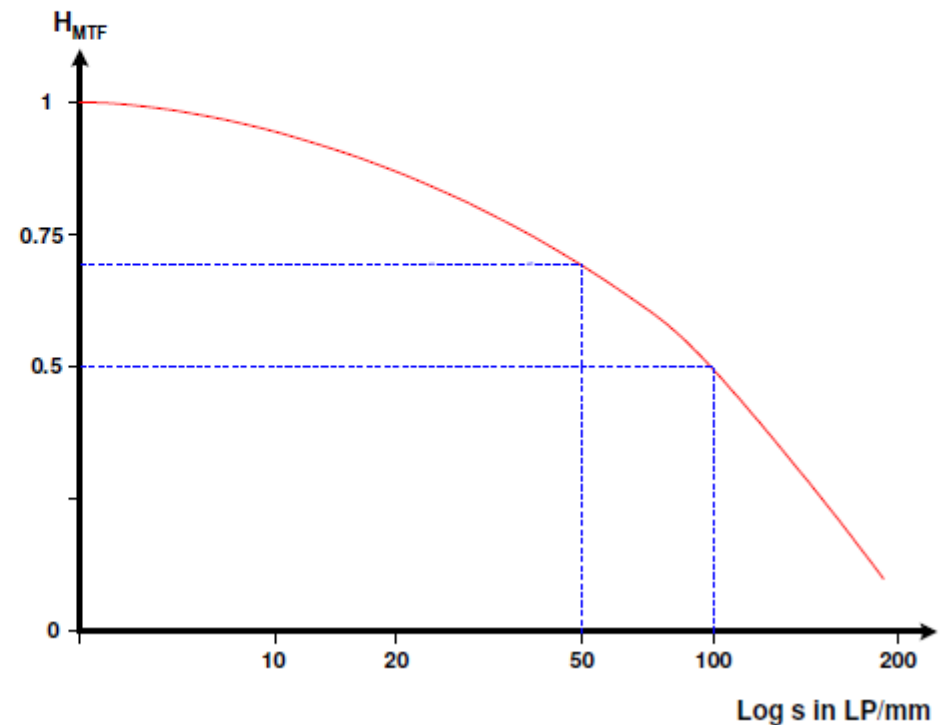
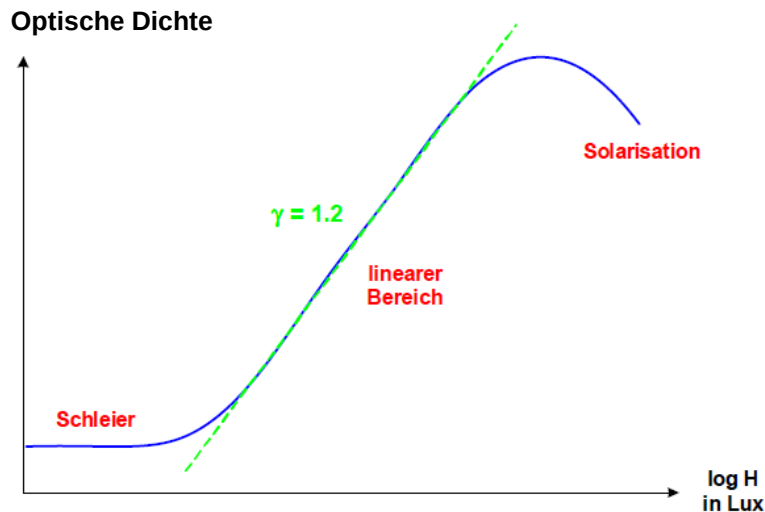
Standardisierter spektraler Hellempfindlichkeitsgrad (DIN 5031)



$V(\lambda)$ -
Tagsehen

$V'(\lambda)$ -
Nachtsehen

- Chemischer Detektor
- Photonen wandeln Silbersalz um
- Silber-Korngröße legt räumliche Auflösung fest
MTF ist spektral abhängig
- Typisch :
50 % Kontrast bei 100 Lp/mm
Bis zu 1000 Lp/mm

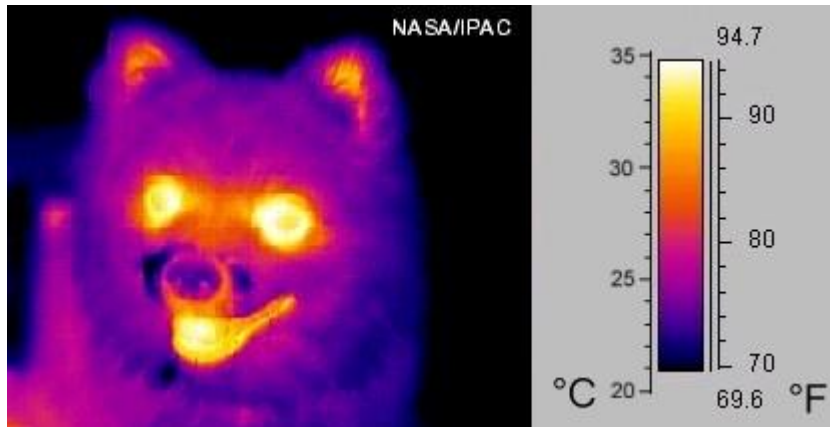


Thermische Detektoren



Anwendung: Hauptsächlich für IR-Bereich ($> 1000\text{nm}$)

Prinzip: Licht wird absorbiert $\rightarrow$ Erwärmung $\rightarrow$ Detektion



Thermosäule (Bolometer mit Thermoelementen)

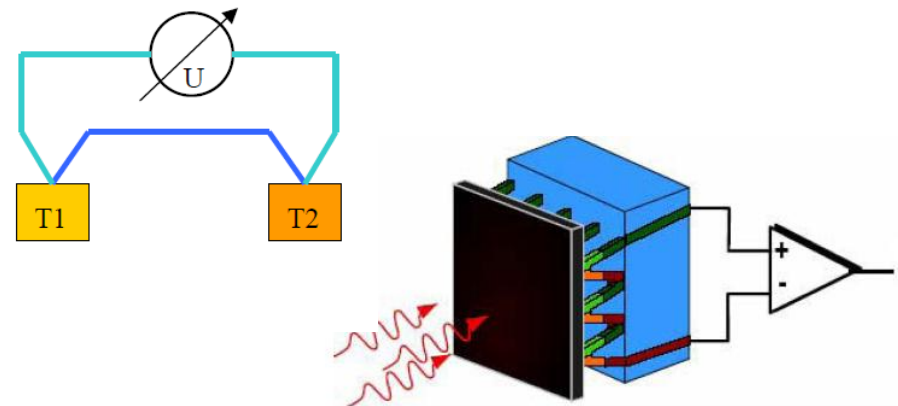
Thermoelement:

An den Kontaktpunkten unterschiedlicher Materialien entsteht eine temperaturabhängige Thermospannung (Seebeck-Effekt)

Bei unterschiedlicher Temperatur von Messpunkt und Referenzpunkt resultiert eine Differenzspannung.

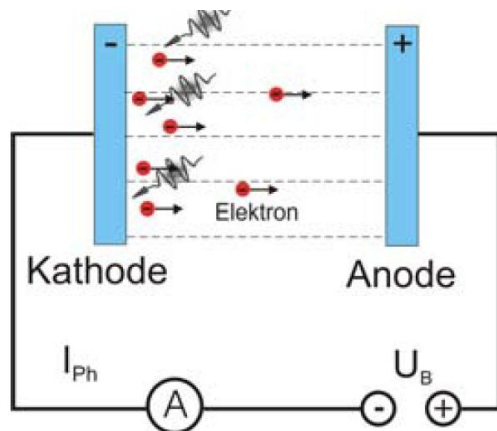
Die Differenzspannung ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Messpunkt und Referenzpunkt.

Thermospannung für Nickel / Chromnickel: $4,1 \text{ mV}/100\text{K}$

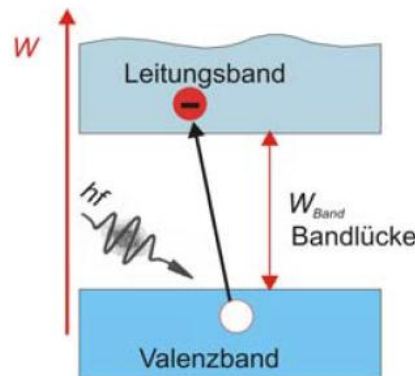


Thermische Detektoren vs. Quantendetektoren

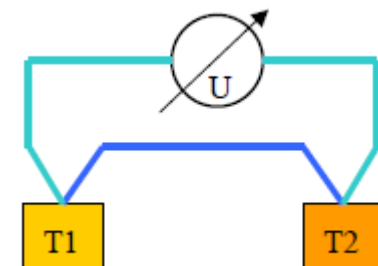
- **Quantendetektoren** oder photoelektrische Detektoren nutzen den *äußeren Photoeffekt* (z.B. Photozelle, Photomultiplier) oder den *inneren Photoeffekt* (z.B. Photowiderstand, Photodiode, CCD).
Funktionsprinzip: Durch Absorption einzelner Photonen werden freie Ladungsträger erzeugt.
- **Thermische Detektoren** (z.B. Bolometer, Thermopile, Pyrometer)
Funktionsprinzip: Temperaturerhöhung durch Absorption einfallender Strahlung.
Die Änderung einer temperaturabhängigen Messgröße (z.B. Thermospannung oder Widerstand) ist dann proportional zur einfallenden Strahlungsleistung.



Äußerer Photoeffekt



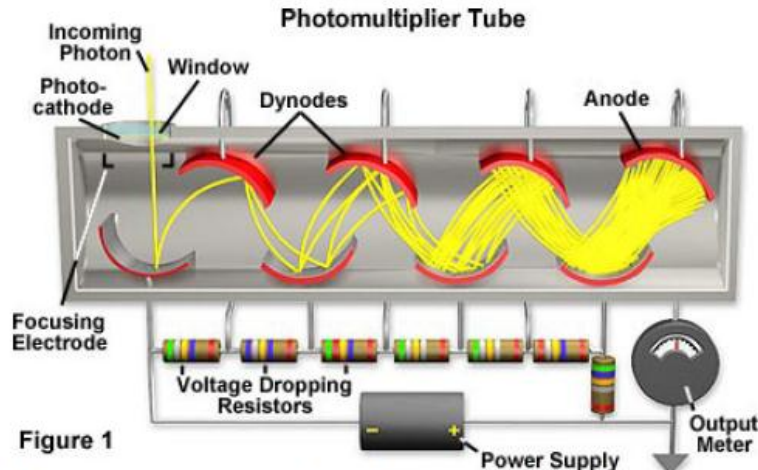
Innerer Photoeffekt
(Halbleitern)



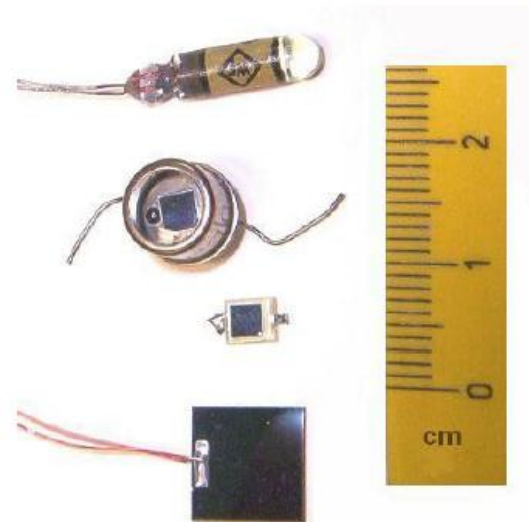
Thermoelektrischer Effekt

Punktdetektoren

- Als Punktdetektoren stehen verschiedene Arten von Halbleiter Fotodioden zur Verfügung
- Für die Detektion sehr geringer Lichtstärken gibt es Sonderformen, z.B. Fotomultiplier, Avalanche-Fotodioden



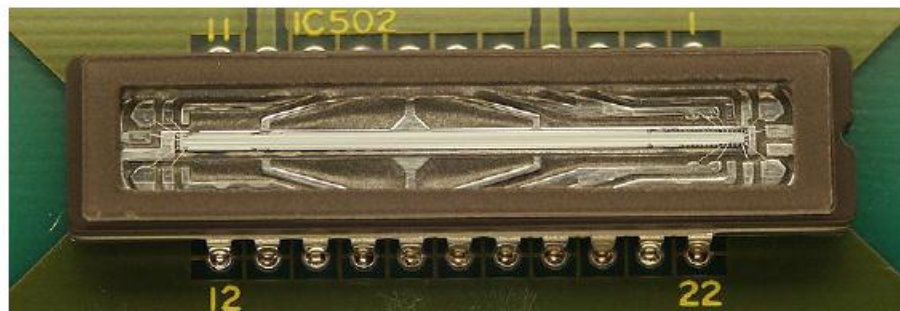
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/photomultipliers.html>



Ulfbastel aus de.wikipedia.org
<http://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>

Linien und Quadranten-Detektoren

- CCD-Liniensensor werden eingesetzt, wenn eine schnelle Detektion gefordert ist, bzw. die zweite Dimension durch einen Scan realisiert wird (z.B. Scanner, Spektrometer)
- Für die Detektion von Strahlauslenkungen oder in Interferometern werden Positions-Sensitive-Dioden eingesetzt (z.B. Quadrantendioden)



<http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>

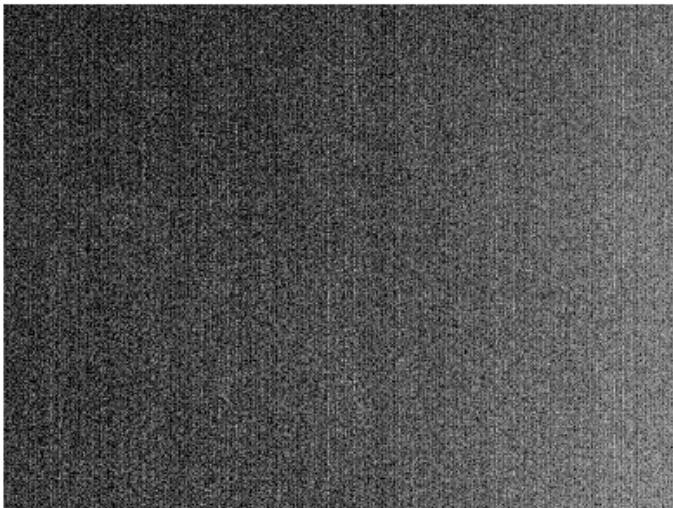
Flächendetektoren

- CCD (Charged Coupled Device)
- CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor)

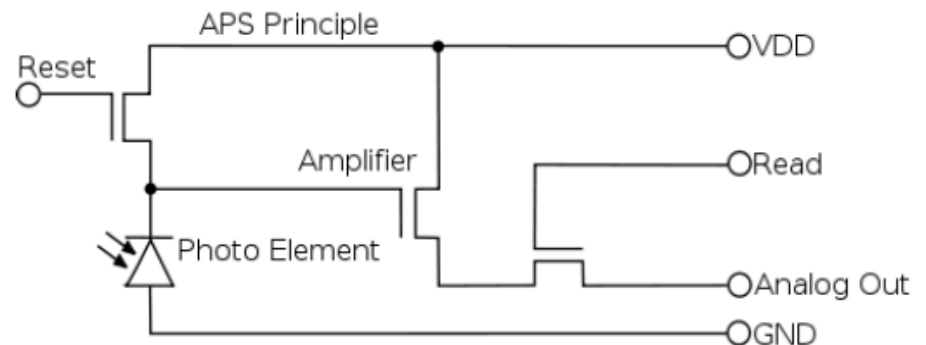
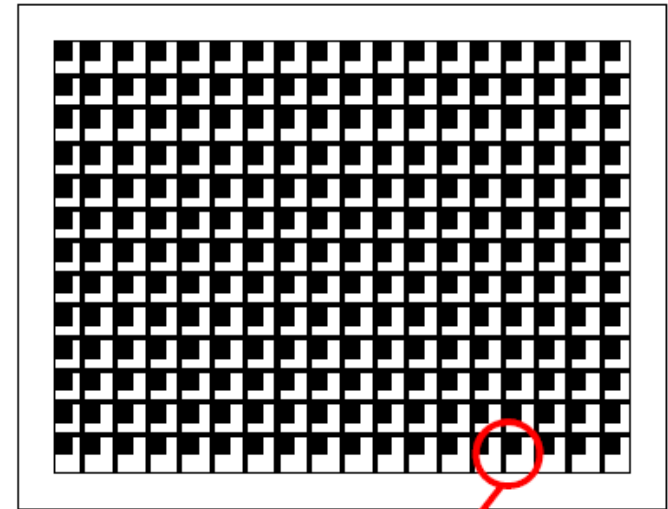
	CCD	CMOS
Sensitivität	+	-
Zusatzfunktionen	-	+
Rauschen	+	-
ROI	-	+
Geschwindigkeit	-	+

CMOS

- Jeder Pixel hat eigenen Verstärker
- Im Vergleich zu CCD geringer Füllfaktor
- Artefakte durch Fertigungstoleranzen
- Zusätzliche Funktionen im Pixel integrierbar (log, „Smart“-Pixel, ...)



Dunkelbild eins CMOS-Sensors

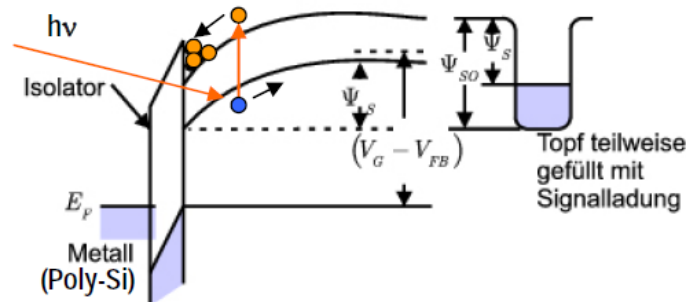


http://de.wikipedia.org/wiki/Active_Pixel_Sensor

CCD

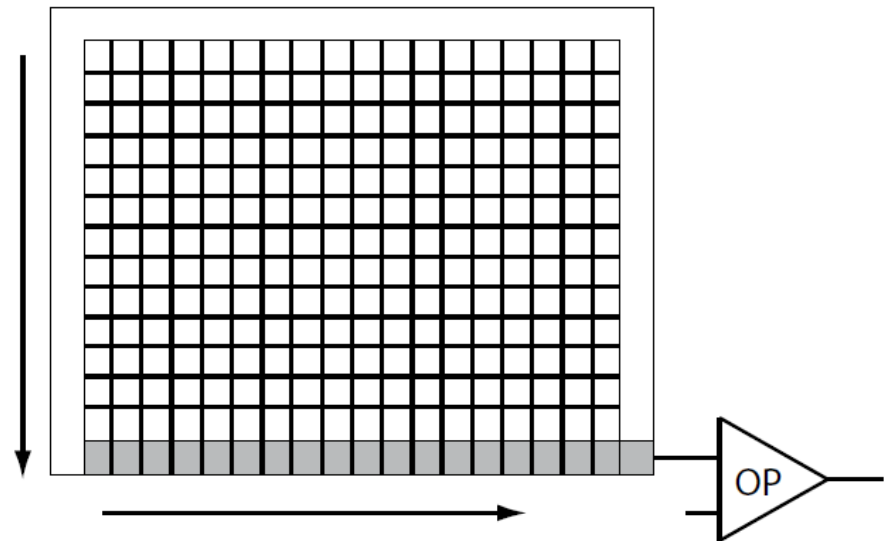
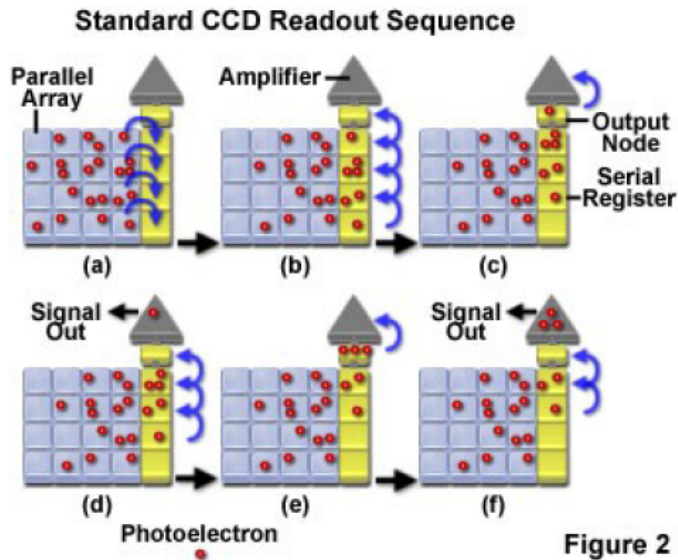
Unterschiedliche Arten:

- „normal“
- Interline-Transfer, Frame-Transfer, Frame-Interline-Transfer
- Langsamer als CMOS
- Höhere Lichtsensitivität (da höherer Füllfaktor, speziell: Fullframe, Frametransfer Sensoren)
- Keine „Smart-Kameras“ möglich
- Normalerweise lineares Ansprechverhalten
- Zeigen üblicherweise Artefakte bei Überbelichtung (Blooming, Smearing)



Fullframe CCD Sensor Auslesen:

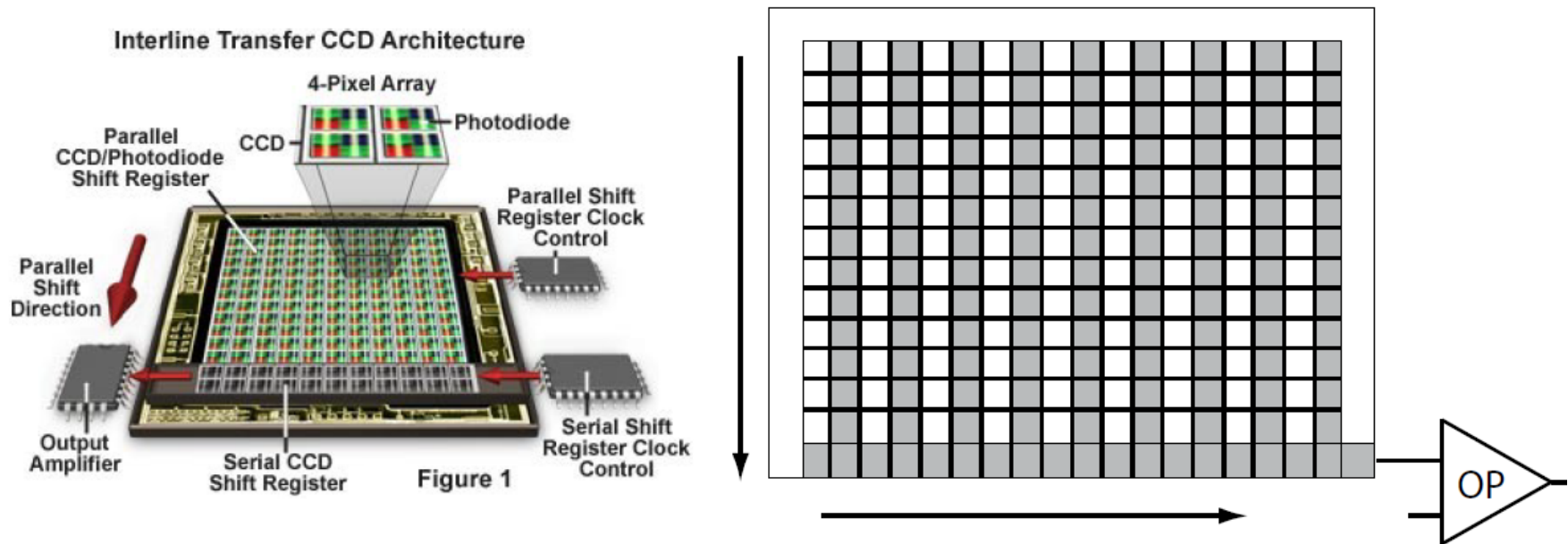
- Spalten und Zeilenweises „Ausschieben“ dann Signalaufbereitung (Verstärkung, AD Wandlung, ...)



<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/readoutandframerates.html>

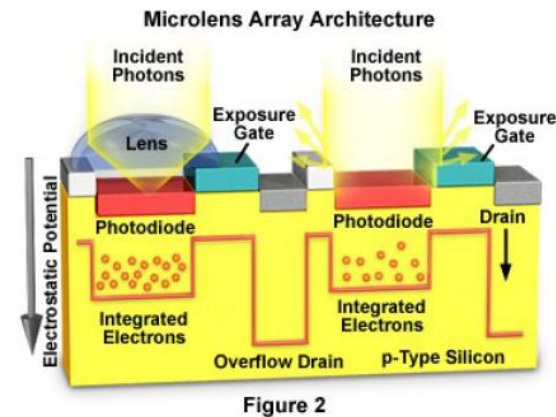
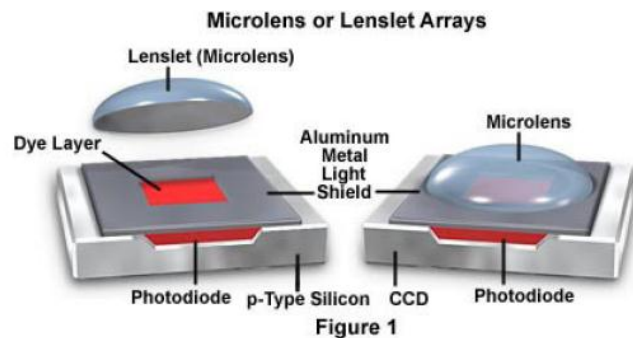
Interlinetransfer (IT) CCD Sensor Auslesen:

- Zuerst schneller Transfer in benachbarte abgedunkelte Zeilen
- Dann „Ausschieben“, Signalaufbereitung (Verstärkung, AD Wandlung, ...)



<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/interline.html>

- Mikrolinsen werden zu Erhöhung des Füllfaktors eingesetzt, z.B. bei IL-CCD, CMOS Sensoren
- Durch zusätzliche Blenden und Sperrstrukturen können Blooming und Smearing reduziert werden



<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/microlensarray.html>

13 Grundlagen optischer Detektoren

13.1 Überblick Detektoren

13.2 Pixeldetektoren & Optik

13.3 Detektoreigenschaften

Wichtige Kenngröße → **Größe der Detektorfläche**

resolution (hor x ver) ¹	pixel		640 x 480	1392 x 1024
pixel size (hor x ver)	µm ²		9.9 x 9.9	6.45 x 6.45
sensor format / diagonal	inch / mm		1/2" / 7.9	2/3" / 11.14

Quelle: Vorlesung Bildverarbeitung ITO

Sensorgröße (Diagonale):

$$9,9 \mu m \cdot 640 px = 6,336 mm$$

$$9,9 \mu m \cdot 480 px = 4,752 mm$$

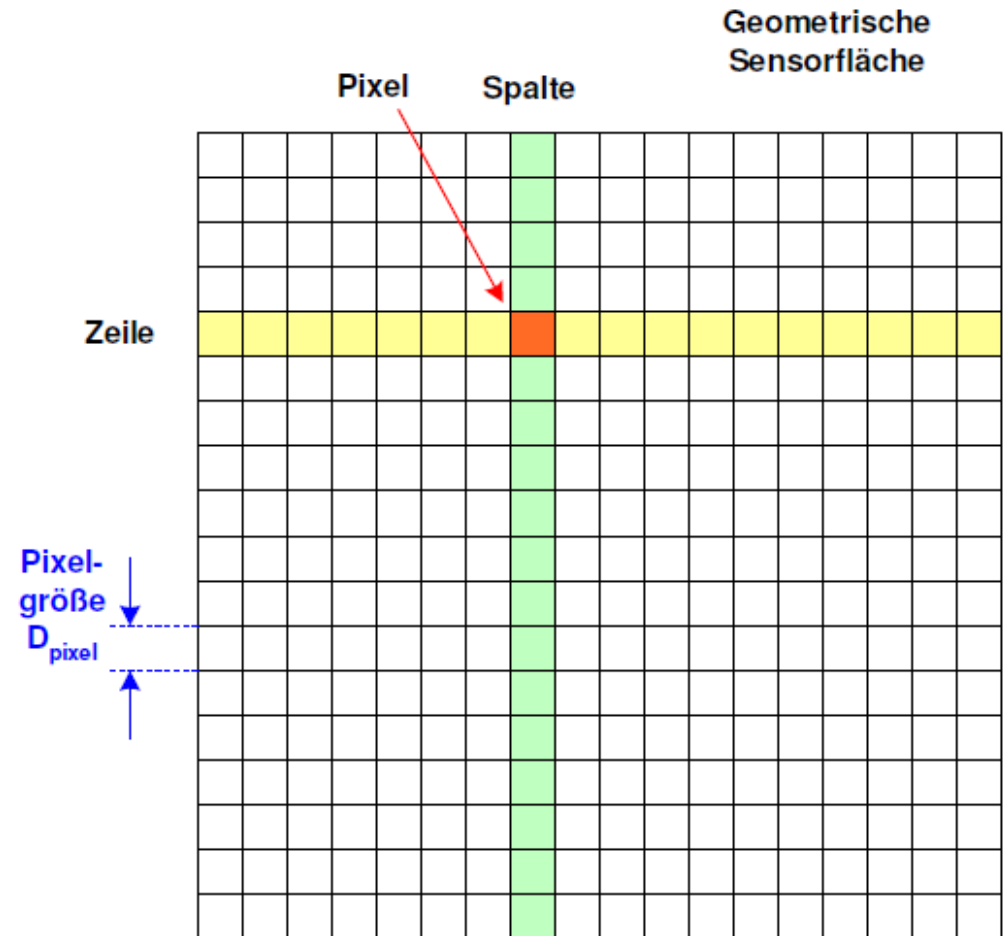
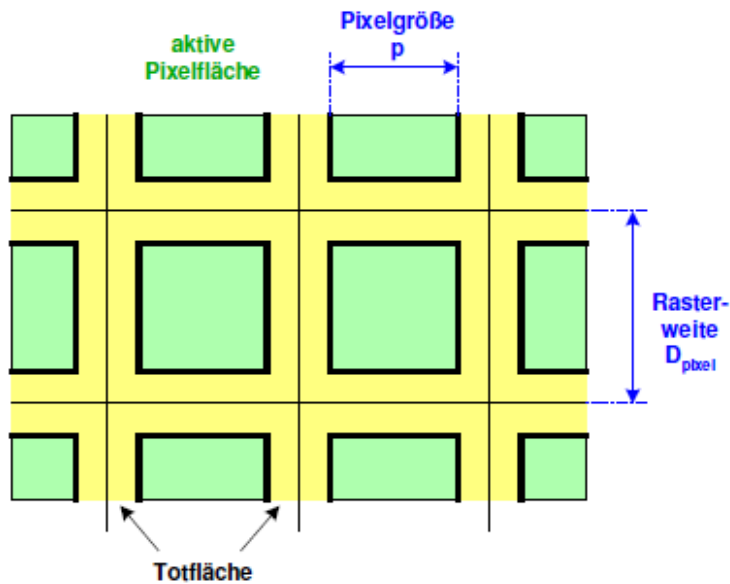
$$\sqrt{6,336^2 + 4,752^2} = 7,92 mm \rightarrow 7,92 mm / 25,4 mm \approx 0,31 ''$$

Achtung: Bezugsgröße für die Zoll-Angabe sind historische 1" Bildröhren mit 16.4mm-Bild-Diagonalen, **d.h. 1" = 16.4mm Diagonale**

$$7,92 mm / 16,4 mm \approx 0,48 ''$$

- Diskrete endliche Pixelflächen :
2D-Empfänger
- Totfläche zwischen den Pixeln

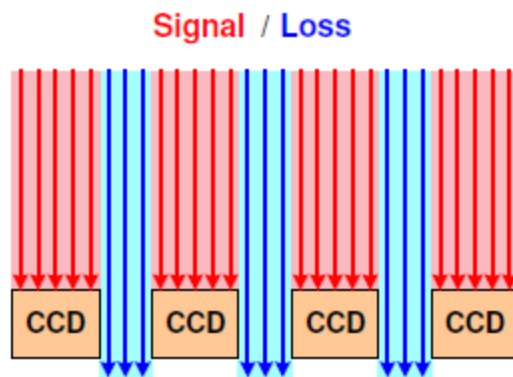
$$\eta = \left(\frac{p}{D_{\text{pixel}}} \right)^2$$



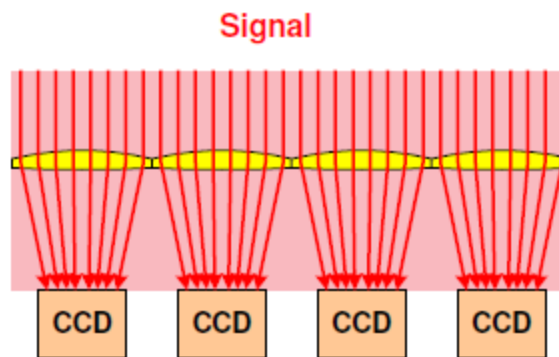
- Übliche Dimensionen :

Größe [mm]		Diagonale [mm]	Pixelgröße [μm]		Pixelzahl	
12.8	9.6	16	16.7	20	768	480
8.8	6.6	11	11.4	13.8	768	480
6.4	4.8	8	8.33	10	768	480
4.8	3.6	6	6.25	7.5	768	480
3.2	2.4	4	4.17	5	768	480

- Optische Wirkung von Arrays : Totfläche und Akzeptanzwinkel verändert



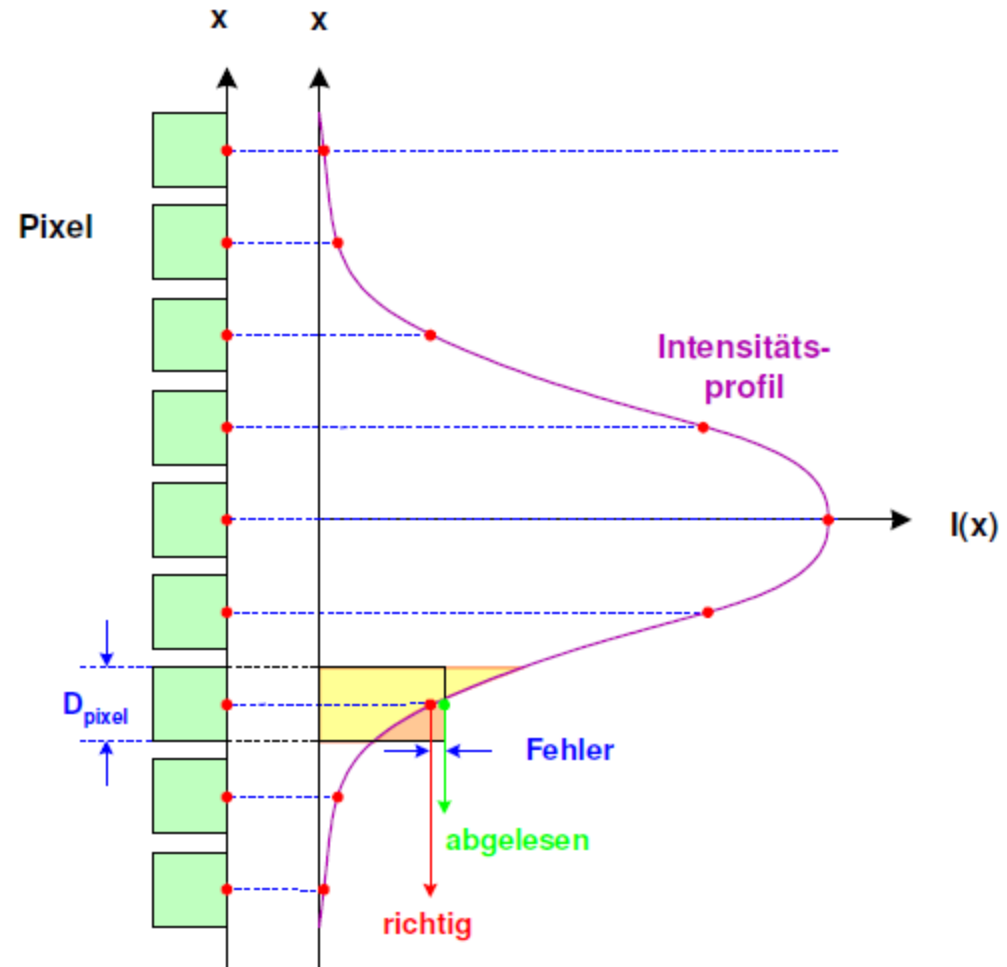
empfindliche Detektorflächen



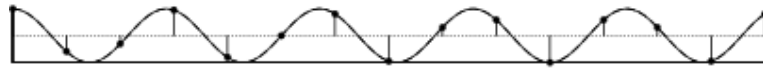
empfindliche Detektorflächen

- Diskrete endliche Pixelflächen :
 - Integration im Pixel
 - Totfläche dazwischen
 - Endliche Größe : Ortsauflösung
- Nyquistfrequenz :

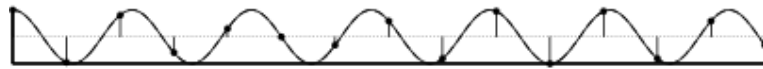
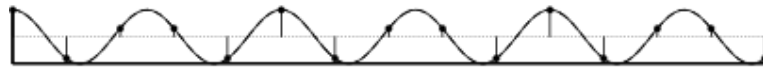
$$s_{Ny} = \frac{1}{2D_{Pix}}$$



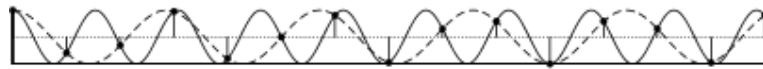
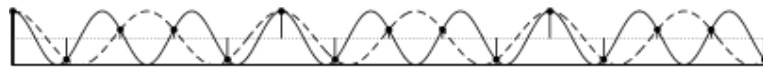
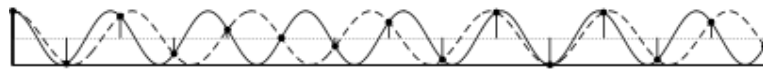
Nyquist-Frequenz - Aliasing



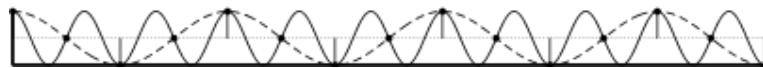
$$s_{Sig} < s_{Ny}$$



$$s_{Sig} = s_{Ny}$$

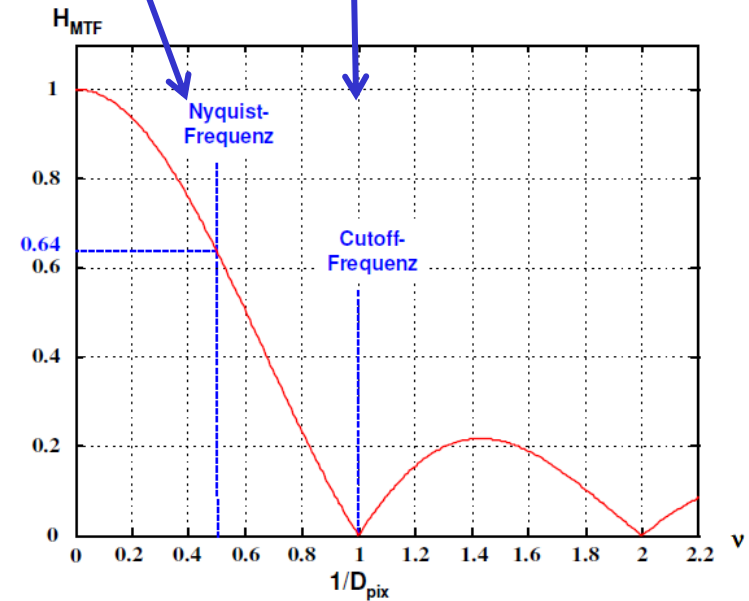
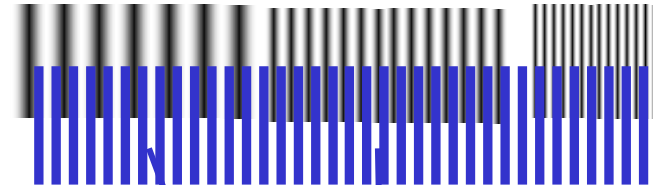


$$s_{Sig} > s_{Ny}$$



Signalfrequenz

$$s_{Sig} = \frac{1}{\text{Periode}}$$



Bei Abtastung mit

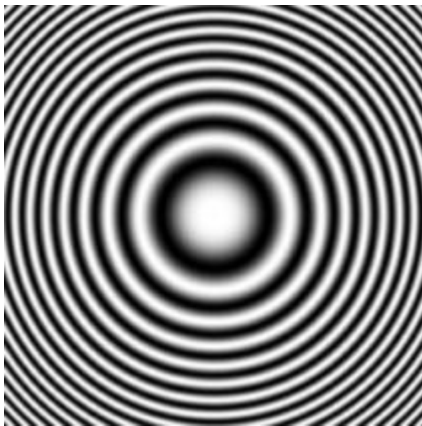
$$s_{Sig} < s_{Ny} = \frac{1}{2D_{Pix}}$$

geht keine Information verloren

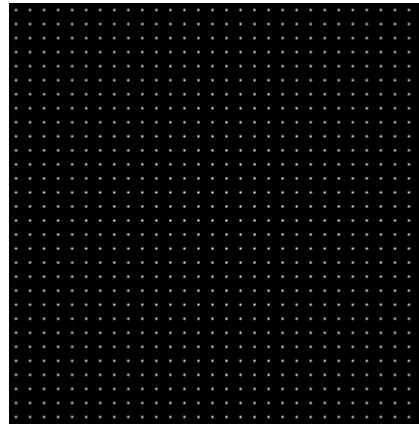
(13.1)

Ist die Signalfrequenz höher als die Nyquist-Frequenz treten Abtasteffekte auf → Aliasing

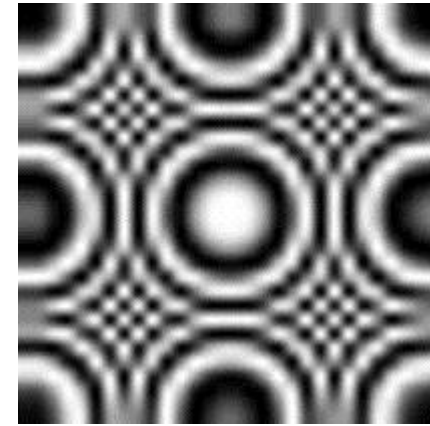
Orginal



Abtast-Raster



Abgetastetes Bild

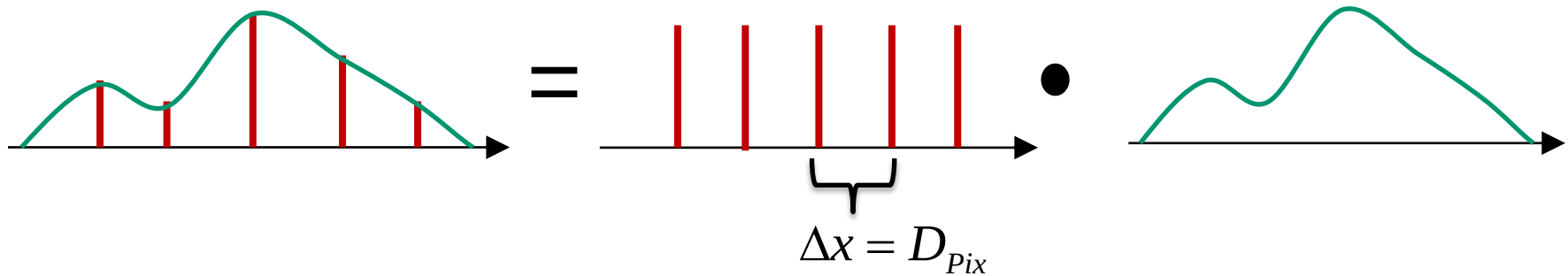


Erinnerung: Fouriertransformation

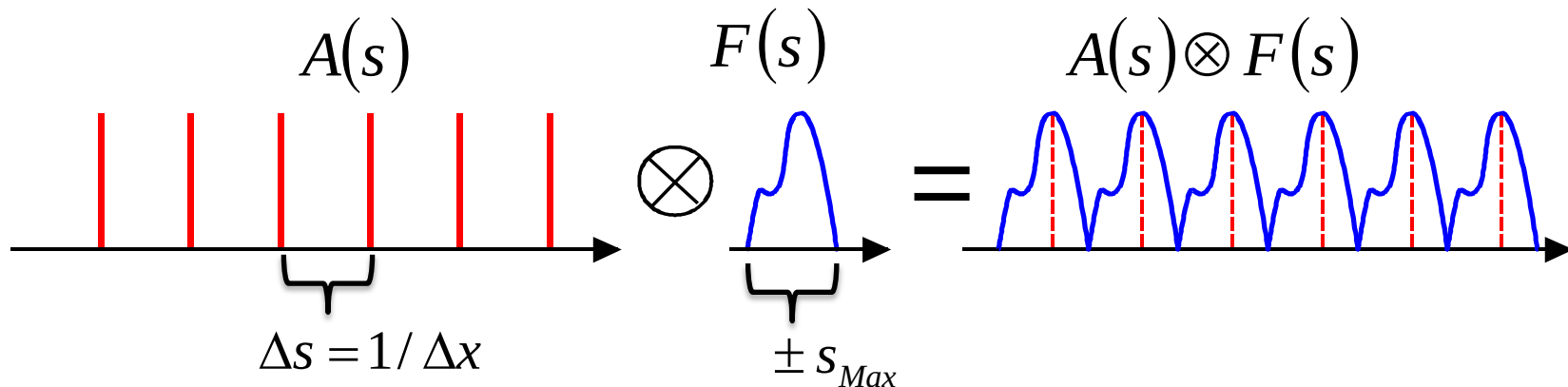
$$f_A(x) = a(x) \cdot f(x)$$

$$a(x)$$

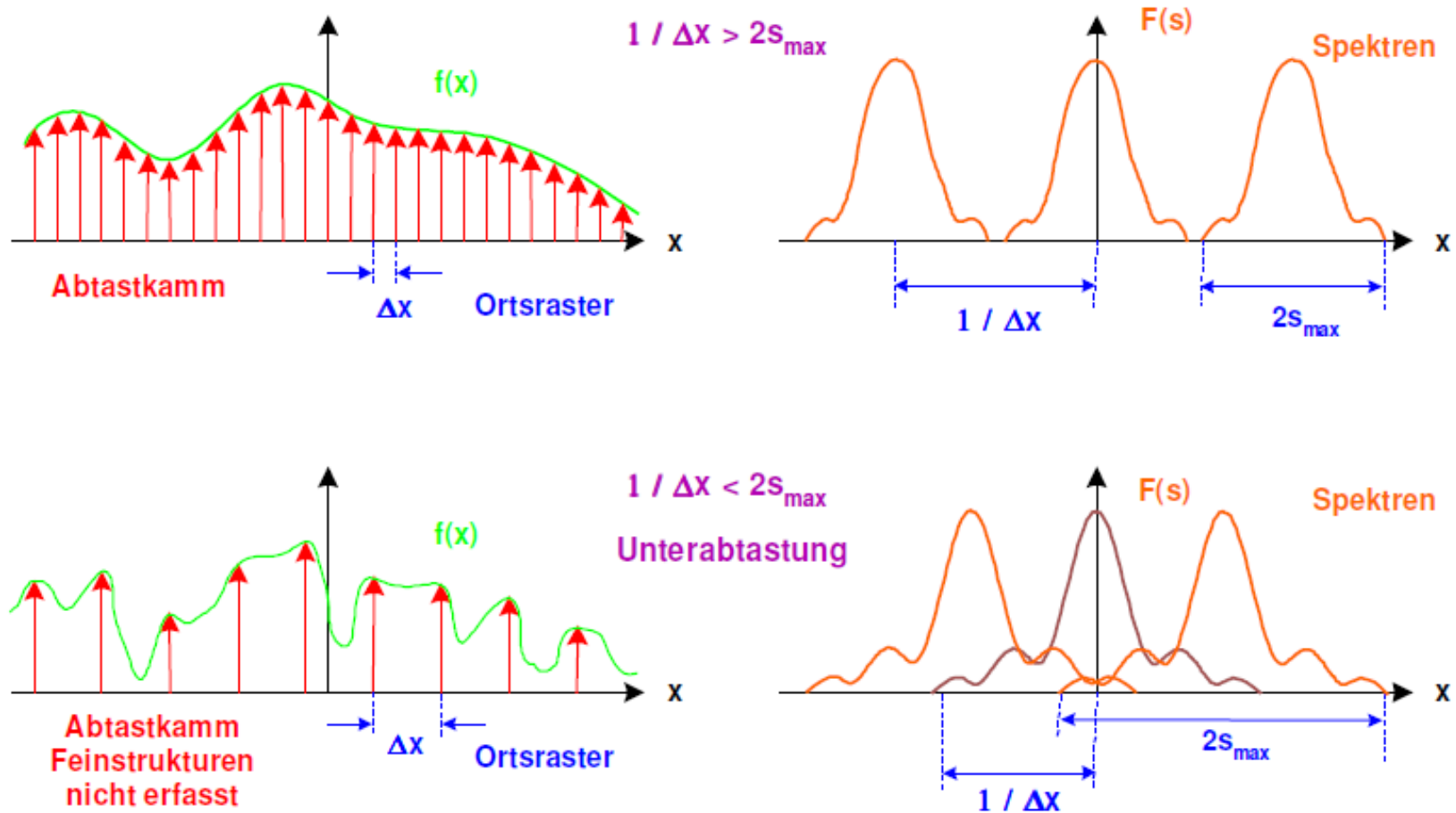
$$f(x)$$



Im Fourierraum (Ortsfrequenzraum s)



Nyquist-Frequenz - Aliasing



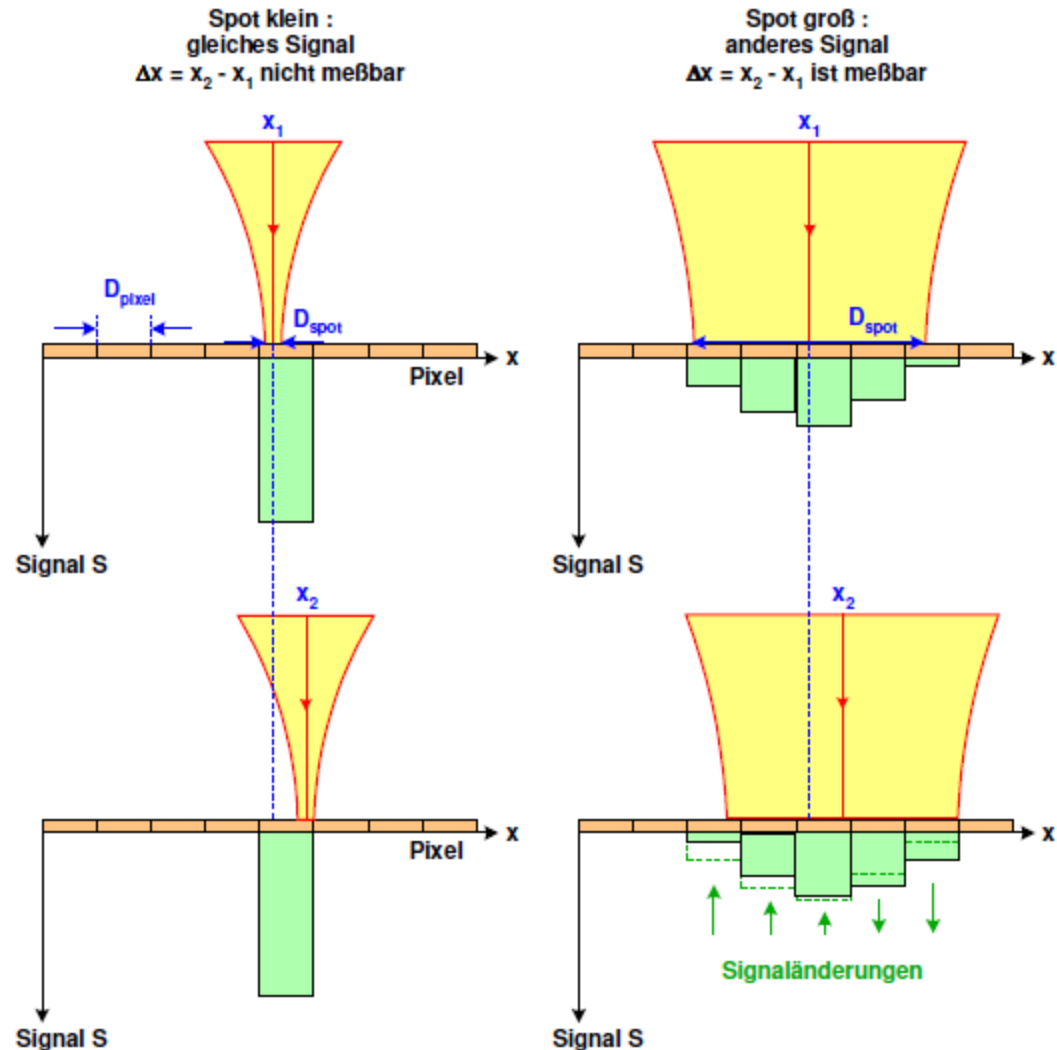
- Diskrete Abtastung :
Periodizität im Frequenzraum begrenzt
die Maximalfrequenz : Nyquistfrequenz

$$s_{\max} < s_{Ny} = \frac{1}{2\Delta x}$$

- Die Spotposition ist genauer detektierbar, wenn der Spot deutlich größer ist als die Pixelbreite
- Signaländerung vieler Pixel : subpixel-genau
- Spot innerhalb Pixel : Position nicht unterscheidbar

➔ Korrektur des optischen Systems, so dass $\text{Spot} \geq \text{Pixelgröße}$

➔ MTF des opt. System ist der MTF des Sensors angepasst



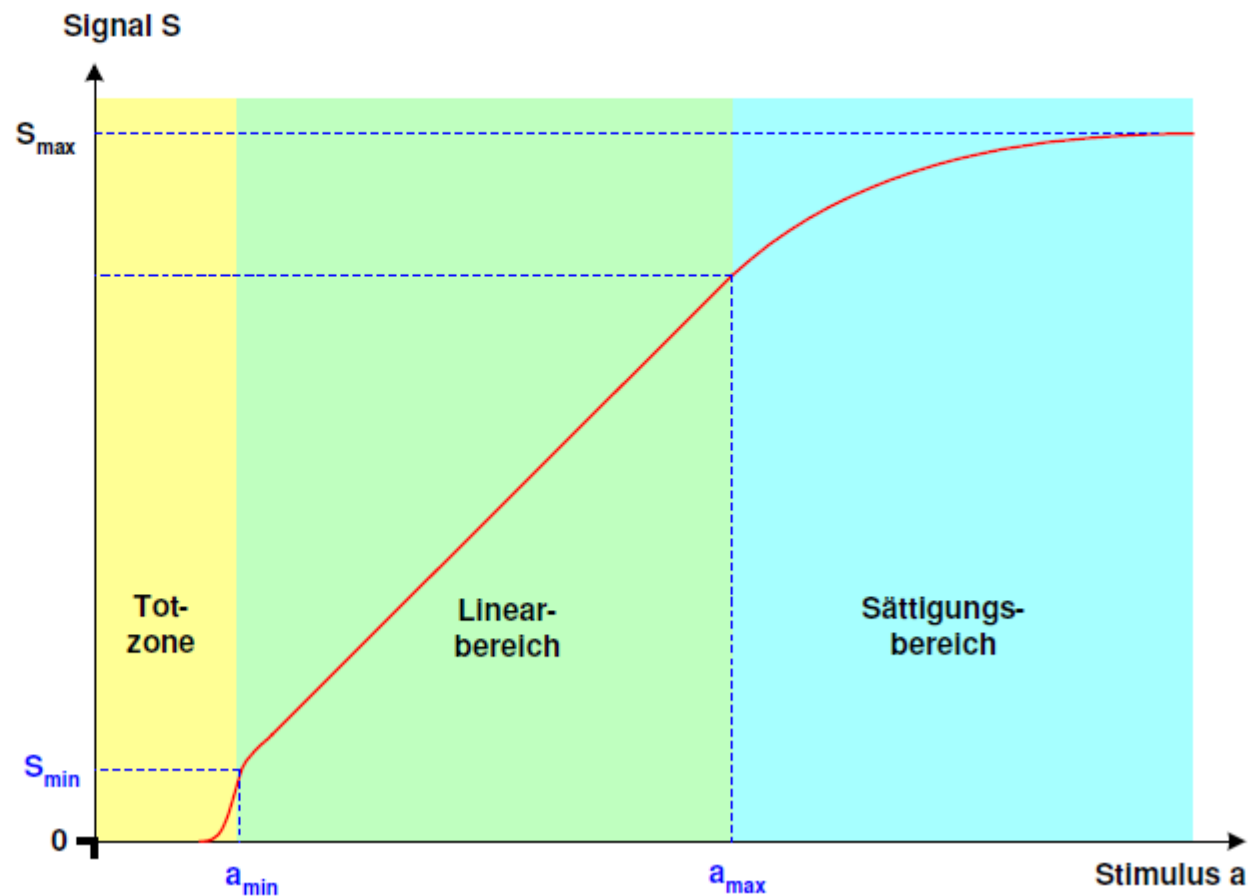
13 Grundlagen optischer Detektoren

13.1 Überblick Detektoren

13.2 Pixeldetektoren & Optik

13.3 Detektoreigenschaften

- Grundsätzlich : endlicher Betriebsbereich
- Begrenzungen :
 - oben : Sättigung
 - unten : _ Rauschen



Dynamikbereich eines Detektors



Dynamikbereich ist der Quotient der größten zur kleinsten Signalstärke
Logarithmische Angabe in Dezibel [dB]

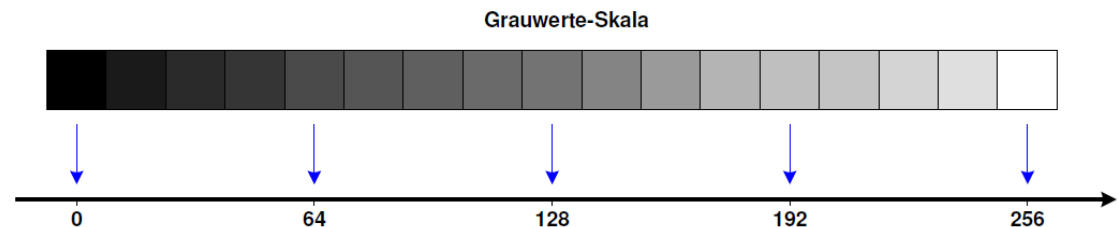
$$Dyn = 20 \cdot \log \left(\frac{S_{Max}}{S_{Min}} \right) \quad (13.2)$$

Für digitales Signal → Binärcode - bit

→ Dynamikbereich (ohne Rauschen) kann in bit-Anzahl angegeben werden

→ Z.B. 12 bit CCD

$$\begin{aligned} Dyn_{bit} &= 20 \cdot \log \left(\frac{2^{12} - 1}{1} \right) \\ &= 20 \cdot \left(\frac{4095}{1} \right) = 72 [dB] \end{aligned}$$



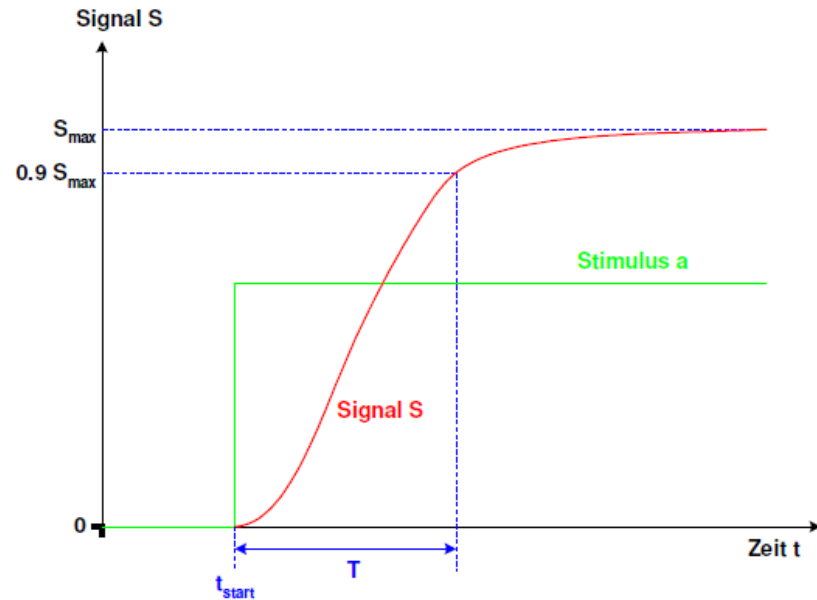
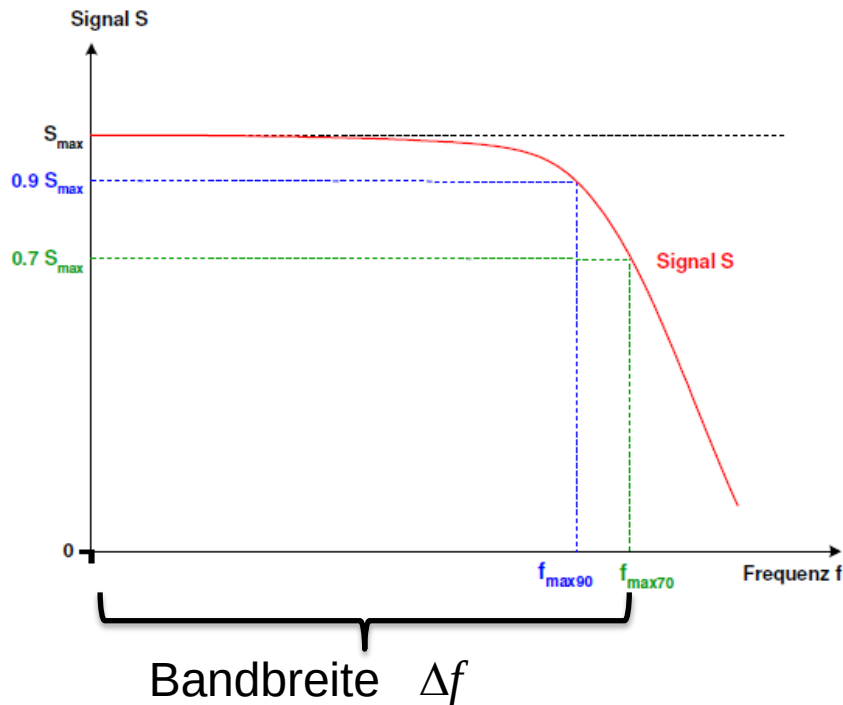
Minimales Signal ist durch Rauschen limitiert

→ Angabe in ADU (analog digital units)

$$Dyn_{Real} = 20 \cdot \left(\frac{4095}{1.5 ADU} \right) = 68.7 [dB]$$

dynamic range	dB	CCD + camera	68.7	69.5
dynamic range A/D ²	bit		12	12

- Stellgröße eingeschaltet :
Sensor reagiert zeitverzögert
Einschaltkurve mit Zeitkonstante als
Charakteristikum
- Alternative Beschreibung :
Frequenzgang bei periodischer Anregung



Es gilt
(wegen Fourier-Beziehung)

$$\Delta f = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}$$

Quantenwirkungsgrad (quantum efficiency)

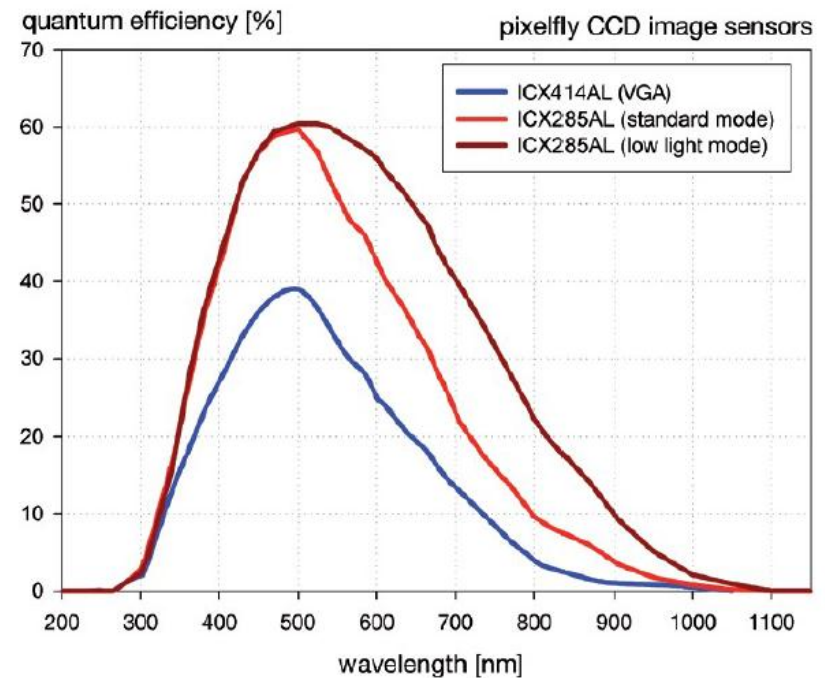
$$\eta = \frac{\text{Erzeugte Elektronen / Zeit}}{\text{Einfallende Photonen / Zeit}} = \frac{n_e}{n_{ph}} \quad (13.3)$$

Photonen pro Zeit

$$n_{ph} = \frac{N_{ph}}{\Delta t}$$

Elektronen pro Zeit

$$n_e = \frac{N_e}{\Delta t}$$



Umrechnung der Quanteneffizienz η auf elektrische Größen (Strom [A]) und lichttechnische Größen (Lichtstrom [W]) liefert **Spektrale Empfindlichkeit**

$$S_{\lambda} = \frac{\text{Erzeugter elekt. Strom}}{\text{Einfallender Lichtstrom (Leistung)}} = \frac{I_e}{P_{Ph}} = \frac{n_e \cdot e}{n_{Ph} \cdot hc} \cdot \lambda = \eta \cdot \frac{e}{hc} \cdot \lambda \quad \left[\frac{A}{W} \right] \quad (13.4)$$

Photonen

$$E_{Ph} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad [J] \quad h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

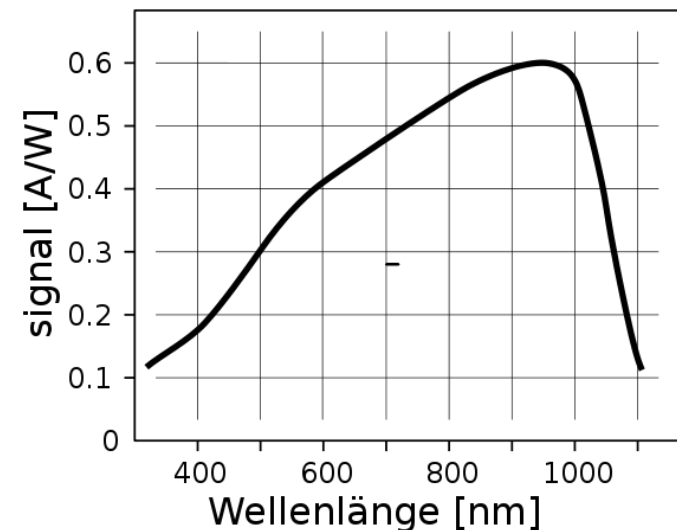
$$P_{Ph} = \frac{N \cdot E}{\Delta t} = \frac{h \cdot c \cdot n_{Ph}}{\lambda} \quad [W = J / s]$$

Elektronen

$$Q_e = e \quad [C] \quad e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$I_e = \frac{N \cdot e}{\Delta t} = e \cdot n_e \quad [A = C / s]$$

KaiMartin aus de.wikipedia.org



Bei $\lambda = 1 \mu\text{m}$ $S_{\lambda} = \eta \cdot \frac{e}{hc} \cdot \lambda = \eta \cdot 0.8 \frac{A}{W}$

Rauschen:

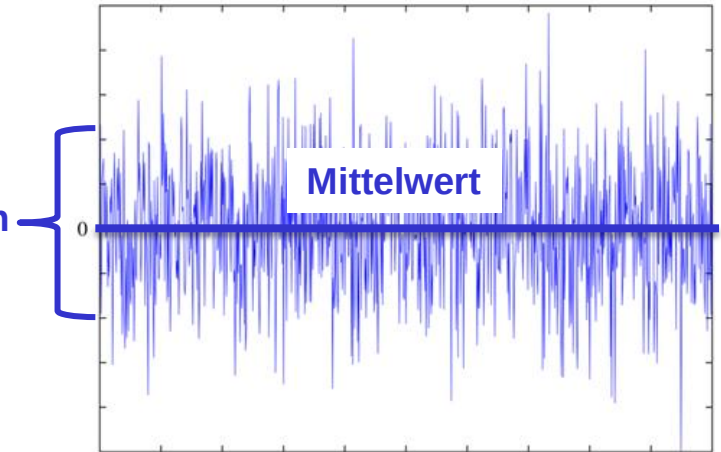
= Schwankung des Signals um den Mittelwert

Hier: Stromschwankungen

Strom = Anzahl Elektronen / Zeit

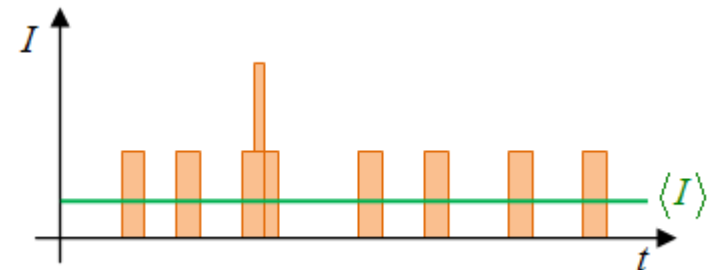
Rauschen = Zufälliges Ankommen von
Signal und Stör-Elektronen

Rauschen



$$I = \frac{N \cdot e}{\Delta t} = e \cdot n_e$$

Der aktuelle Stromwert hängt also von der Anzahl N der Elektronen pro Zeitintervall ab. Dieser Wert schwankt statistisch um den Mittelwert



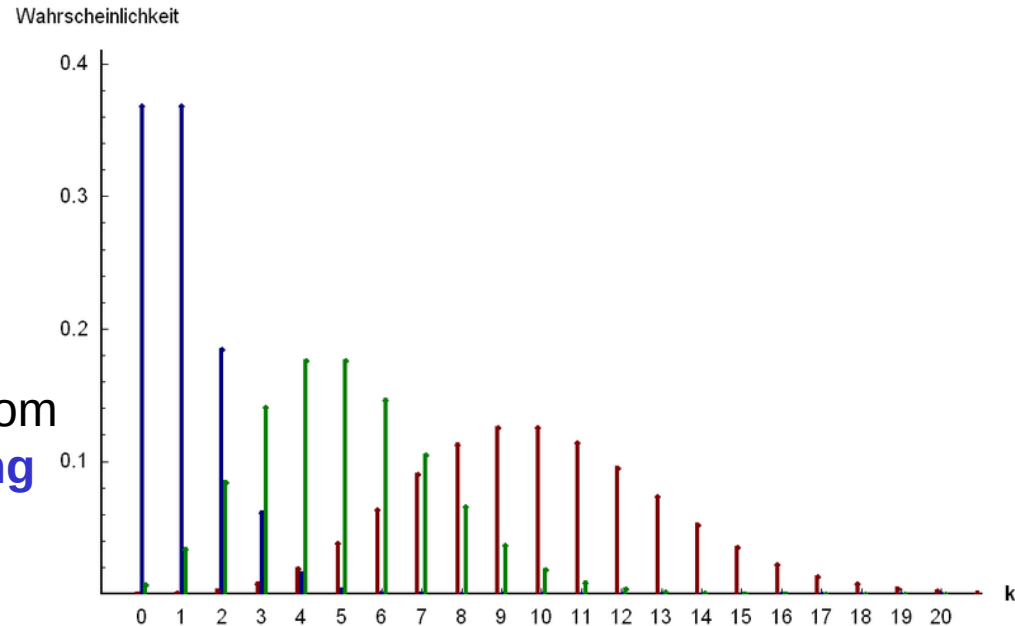
$$\langle I \rangle = I_0 = \frac{\langle N \rangle \cdot e}{\Delta t} \quad \langle N \rangle = \frac{I_0 \cdot \Delta t}{e}$$

Statistische (ja/nein)- Prozesse
folgen der **Poisson-Statistik**
(Mittelwert $\lambda = \langle N \rangle$)

$$P_{\lambda}(N) = \frac{\lambda^N}{N!} \cdot e^{-\lambda}$$

Maß für die Abweichung (Rauschen) vom
Mittelwert ist die **Standardabweichung**

$$\sigma^2 = \langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2$$



Für die Poissonverteilung gilt: Standardabweichung = Mittelwert

$$\sigma^2 = \lambda = \langle N \rangle \quad \sigma = \sqrt{\langle N \rangle} \quad \frac{\sigma}{\langle N \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\langle N \rangle}}$$

→ Allgemein:

- Rauschen nimmt mit zunehmender Signalstärke ab
- Auch bei Messungen nimmt die Breite der Verteilung mit der Zahl der unabhängigen Messungen ab

Rauschen

= Schwankung des Strom-Signals
um den Mittelwert

$$i_R^2 = \sigma_R^2 = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2$$

$$= \frac{e^2}{\Delta t^2} \underbrace{(\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2)}_{\sigma = \langle N \rangle}$$

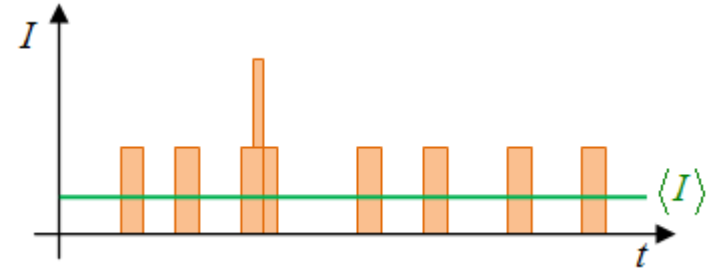
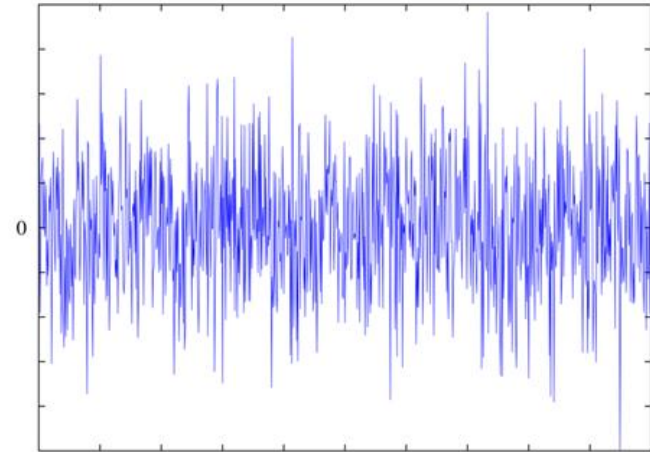
$$= \frac{e^2}{\Delta t^2} \cdot \langle N \rangle$$

$$= \frac{I_0 \cdot e}{\Delta t}$$

$$\frac{1}{\Delta t} = 2\Delta f$$

$$i_R^2 = e \cdot I_0 \cdot \frac{1}{\Delta t} = 2 \cdot e \cdot I_0 \cdot \Delta f$$

(13.5)



Schrotrauschen (shot noise)
Diskretisierungsrauschen

Verhältnis aus Signalstärke zu Rauschstärke

$$SNR = \frac{\text{Signalstrom}}{\text{Rauschstrom}} = \frac{I_0}{i_R}$$

Für Schrotrauschen gilt z.B.: $i_R = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_0 \cdot \Delta f}$

$$SNR = \frac{I_0}{i_R} \propto \frac{\sqrt{I_0}}{\sqrt{\Delta f}}$$

Es gibt neben dem Schrotrauschen eine ganze Reihe von weiteren Rauschquellen – ähnlich wie beim Schrotrauschen gilt meist $i_R \propto \sqrt{\Delta f}$

➔ Daher wird oft der normierte Rauschstrom verwendet:

$$\tilde{i}_R = \frac{i_R}{\sqrt{\Delta f}}$$

NEP = Lichtpegel der ein Signal-Rausch-Verhältnis von 1 erzeugt
(bezogen auf den normierten Rauschstrom)

$$S_{\lambda} = \frac{I_e}{P_{ph}} \quad \text{für} \quad I_e = \tilde{i}_R \quad P_{ph} = NEP = \frac{\tilde{i}_R}{S_{\lambda}} \quad [W / \sqrt{Hz}]$$

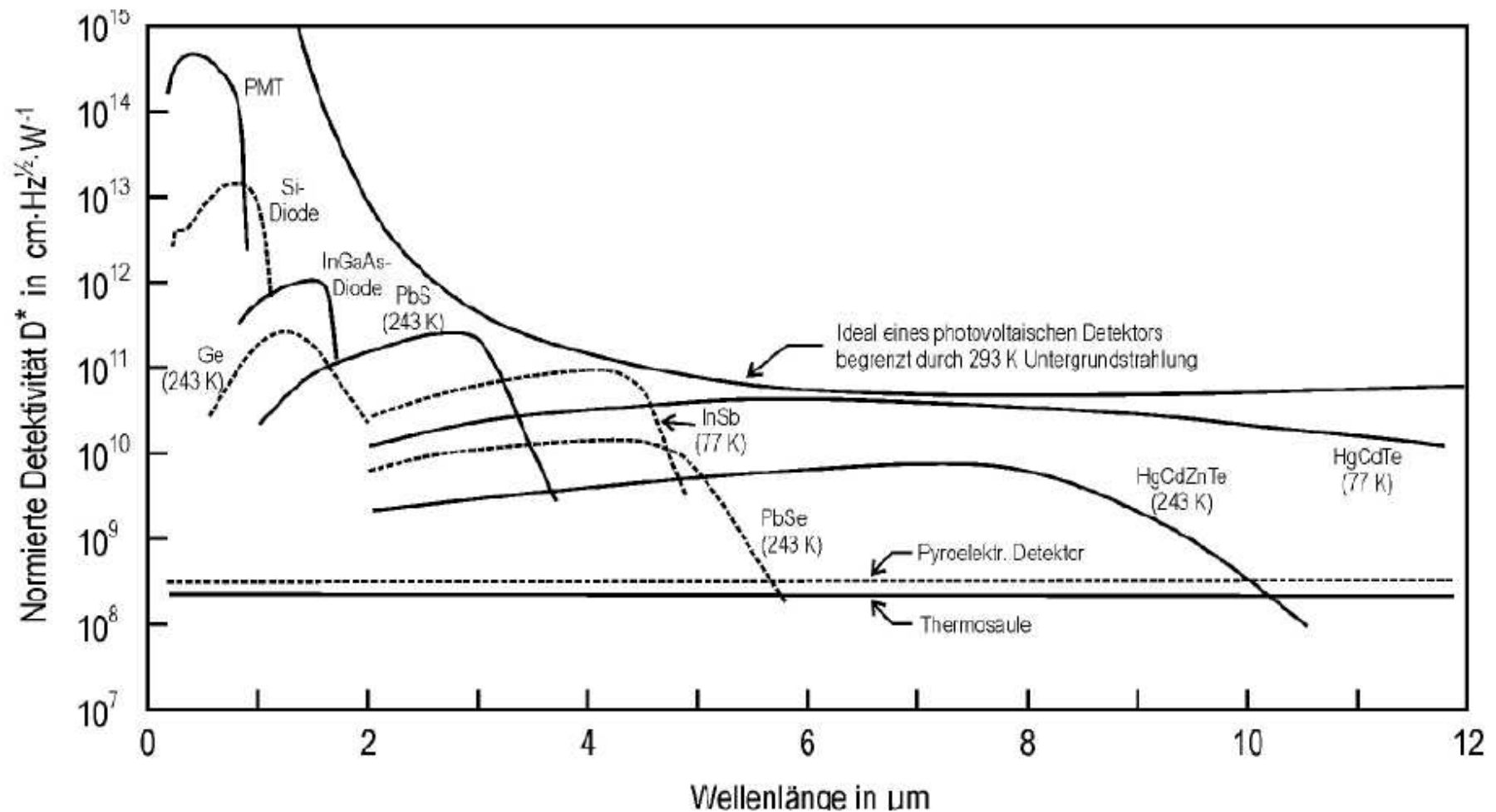
D = Detektivität (Vergleichsgröße für den Vergleich von Detektoren)

$$D = \frac{1}{NEP} = \frac{S_{\lambda}}{\tilde{i}_R} \quad [\sqrt{Hz} / W]$$

D* = Normierte Detektivität

da der Rauschstrom auch proportional zur Wurzel der Detektorfläche A ist, wird der flächennormierte Rauschstrom verwendet

$$\tilde{i}_R^* = \frac{\tilde{i}_R}{\sqrt{\Delta f \cdot A}} \quad D^* = \frac{S_{\lambda}}{\tilde{i}_R^*} = \frac{\sqrt{A}}{NEP} = \sqrt{A} \cdot D \quad [\sqrt{Hz} \cdot cm / W]$$



Hochsensitive Si-Diode → normierte Detektivität

$$D^* = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$$

Detektorfläche $A = 1 \text{ mm}^2 = 0.01 \text{ cm}^2$

Detektivität

$$D = \frac{D^*}{\sqrt{A}} = \frac{3 \cdot 10^{12}}{\sqrt{0.01}} \sqrt{\text{Hz}} / \text{W} = 3 \cdot 10^{13} \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$$

NEP=optische Leistung die
dem Rauschen entspricht

$$NEP = \frac{1}{D} = 3 \cdot 10^{-14} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$$

Die Diode wird bei Videofrequenz betrieben $\Delta f = 9 \text{ MHz} = 9 \cdot 10^6 \text{ Hz}$

→ Minimal detektierbare opt. Leistung

$$P_\lambda = \sqrt{\Delta f} \cdot NEP = 9 \cdot 10^{-11} \text{ W}$$

Der Detektor hat $\lambda = 1 \mu\text{m}$ eine Quanteneffizienz von 60% $S_\lambda = \eta \cdot \frac{e}{hc} \cdot \lambda = 0.5 \cdot A / \text{W}$

Der Signalstrom=Rauschstrom ist

$$I_e = S_\lambda \cdot P_\lambda = 4.5 \cdot 10^{-11} \text{ A}$$