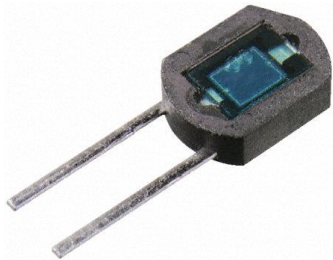


# Übersicht

- Allgemeine Übersicht, Licht, Wellen- vs. Teilchenmodell, thermische Strahler, strahlungsoptische (radiometrische) vs. lichttechnische (fotometrische) Größen
- Beschreibung radiometrische, fotometrische Größen
- Detektoren
- Geometrische Optik
- Bildgebende Verfahren
- Anwendungen
- Licht als elektromagnet. Welle, Interferenz, Kohärenz, Laser, Interferometrie, Anemometrie

# Einteilung

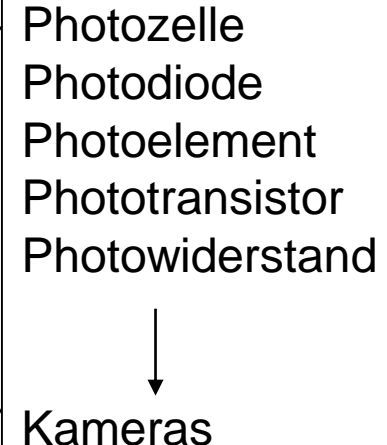


BS520E0F von Sharp

## Empfänger:

Empfindlichkeit  
 Frequenzverhalten  
 Rauschen  
 Lebensdauer  
 Wirkungsgrad

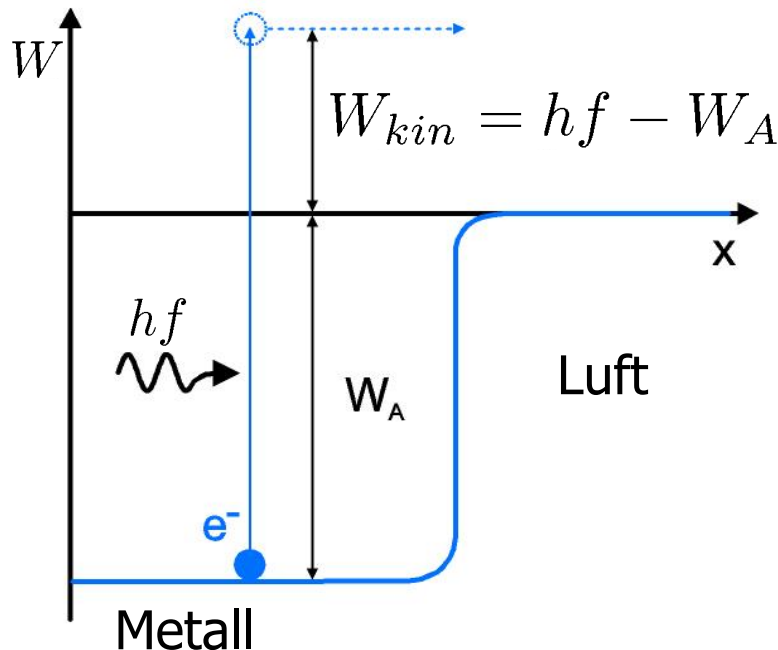
- Physikalisches Prinzip
  - Photoelektrischer Effekt
  - Thermische Detektoren
- Geometrie
  - 0D/1D/2D Detektoren
- Spektralbereich
  - UV, VIS, IR



Many diagrams, tables etc. from:  
 S.O. Kasap. Optoelectronic devices and photonics:  
 Principles and practices. Pearson 2001.

# Photozelle

Grundlage ist der äußere photoelektrische Effekt (Einstein 1905)



Einfallendes Photon bewirkt:

- **Absorption** (niedrige Energie)
- **Auslösen eines Elektrons** bei:

$$W_{Ph} = hf > W_A$$

⇒ Anregung eines Atoms

⇒ Elektron mit  $W_{kin} = hf - W_A$  wird emittiert.

$W_A$  ... Austrittsarbeit für im Metall gebundene Elektronen

# QED – Quantenelektrodynamik

## Dualismus Welle-Teilchen

### Elektron

- Ruhemasse:  $m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{kg}$
- Quantenenergie:  $W = W_{kin} + mc^2$
- Relativistische Masse:  $m_{rel} = \gamma m$  mit  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$
- Impuls:  $p = \frac{\sqrt{W^2 - m^2 c^4}}{c}$

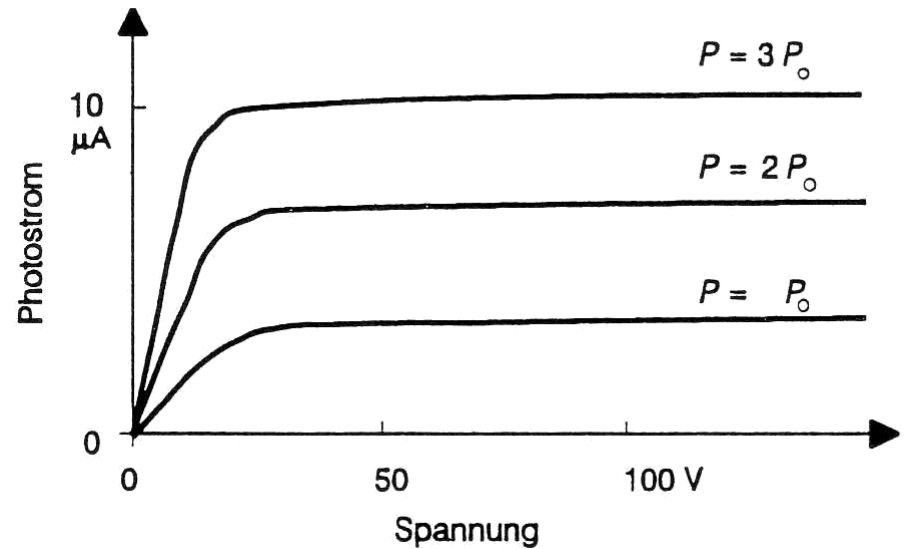
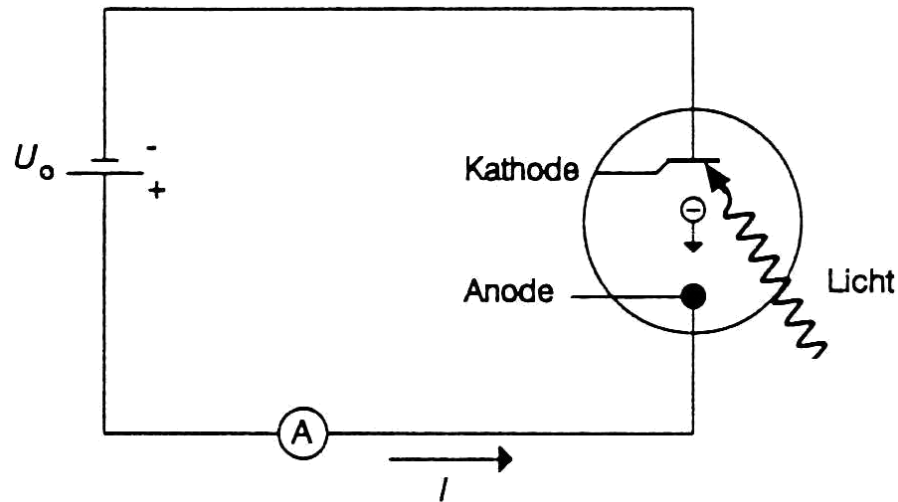
# QED – Quantenelektrodynamik

## Dualismus Welle-Teilchen

### Elektron

- Wellenlänge: 
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{W^2 - m^2 c^4}}$$
- Geschwindigkeit: 
$$v = \frac{pc^2}{W} = c \sqrt{1 - \frac{m^2 c^4}{W^2}}$$
- Kinetische Energie: 
$$W_{kin} = W - mc^2 = mc^2(\gamma - 1)$$

# Funktionsprinzip Photozelle



$P_0$  ... incident optical power [W]

## Eigenschaften:

- Typ.  $\lambda_{\max} = \dots 1 \mu\text{m} \dots$
- Empfindlichkeit typisch ... 10 nA/lx ... (durch Gasfüllung steigerbar)
- Schnell ( ... GHz ... )
- Teuer, Alterung, große Bauform

# Photozelle Beispiel

[<https://de.wikipedia.org/wiki/Photozelle>]

Photozelle, Länge ca. 90 mm;  
die Anode ist ein Drahtbügel, die  
Photokathode wird durch den rückseitig  
innen mit Metall beschichteten  
Glaskolben gebildet

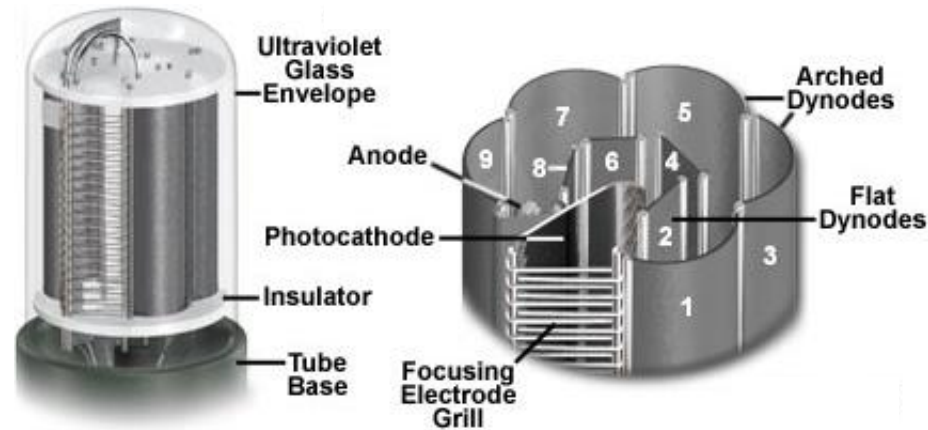
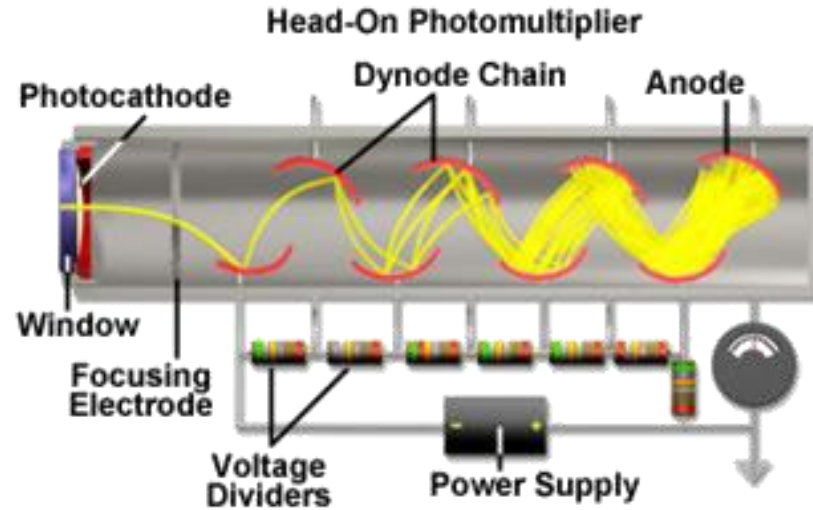
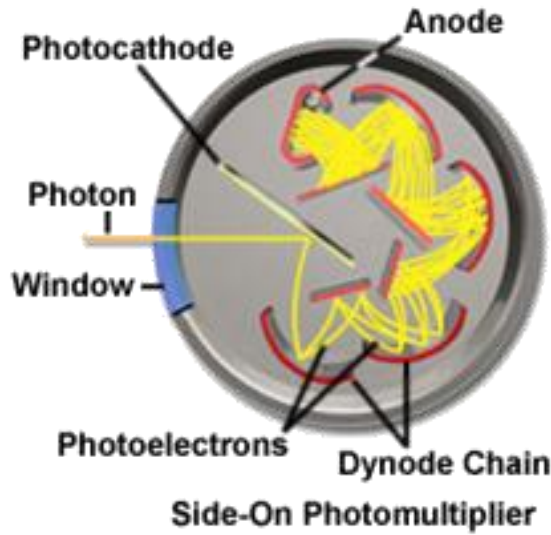


# Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) Photomultiplier-Tube (PMT)

- Primärelektronen werden durch Photonen aus der Photokathode gelöst (äußerer photoelektrischer Effekt)
- Verstärkung von Primärelektronen durch Anordnung von Dynoden mit unterschiedlichen Vorspannungen
- Spektrale Empfindlichkeit abhängig vom Kathodenmaterial
  - UV bis IR möglich
- Lawinenartiger Anstieg freier Elektronen
  - Hohe Sensitivität
  - Hohe Verstärkung

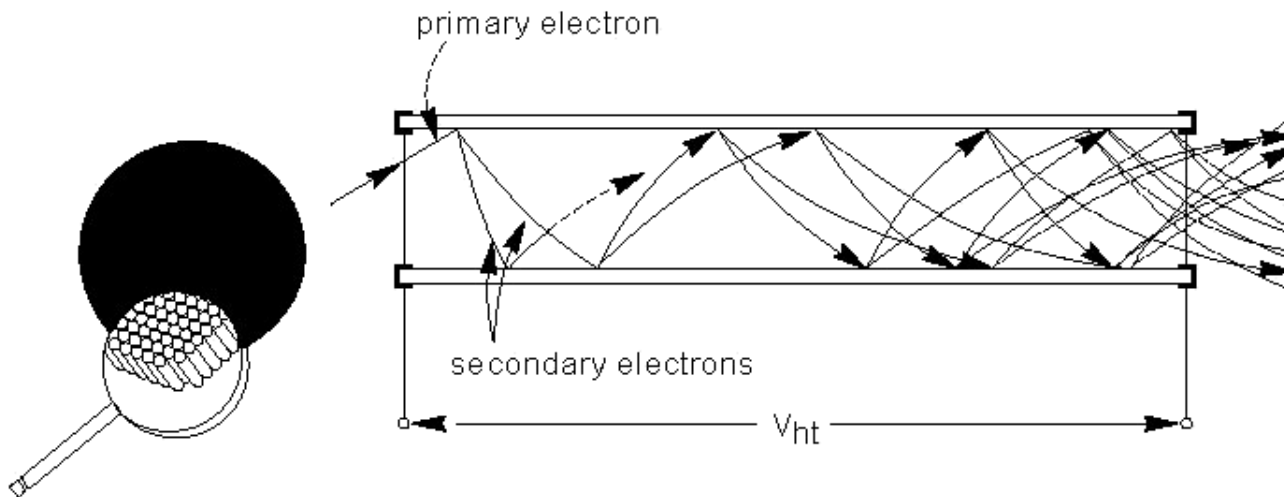


# Funktionsprinzip SEV

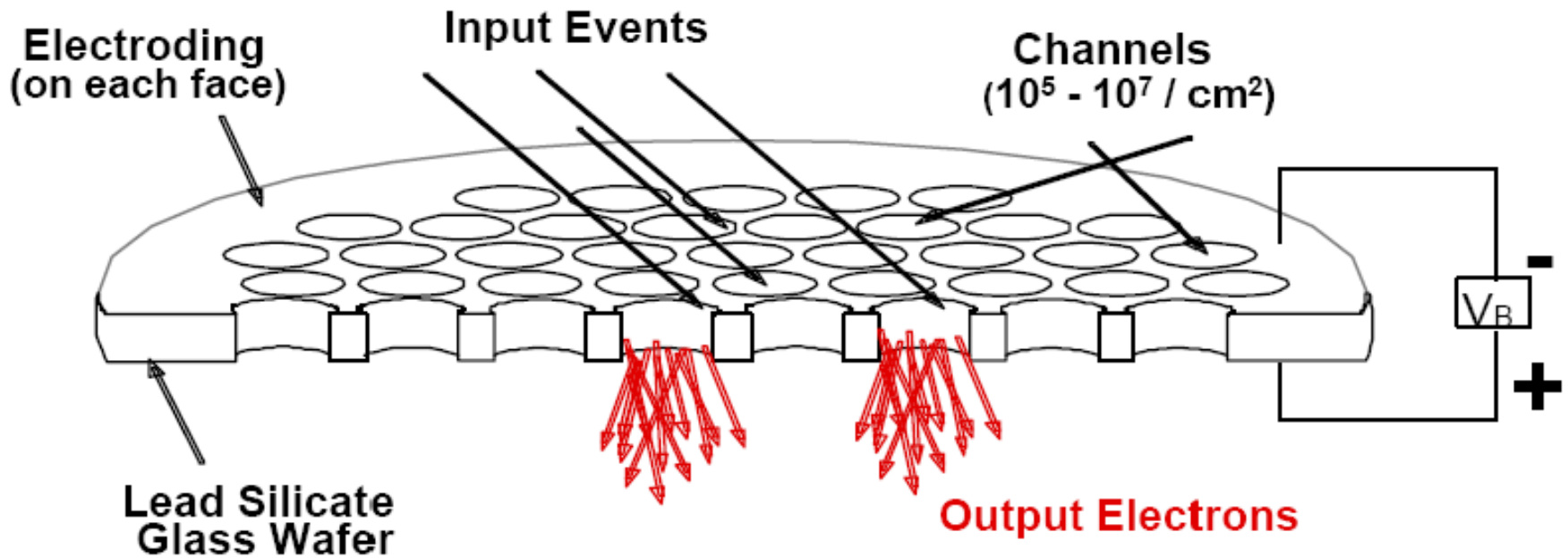


# Sonderform: Kanalelektronen-Vervielfacher Micro-Channel-Plate (MCP)

- 2D SEV  $\Rightarrow$  bildgebende Detektion mit großer Sensitivität
- Meist in Kombination mit 2D Detektor (Schirm, CCD, ...)
- Regelmäßige Anordnung von Kanälen
- Verstärkung von Primärelektronen  $\approx 10^6$

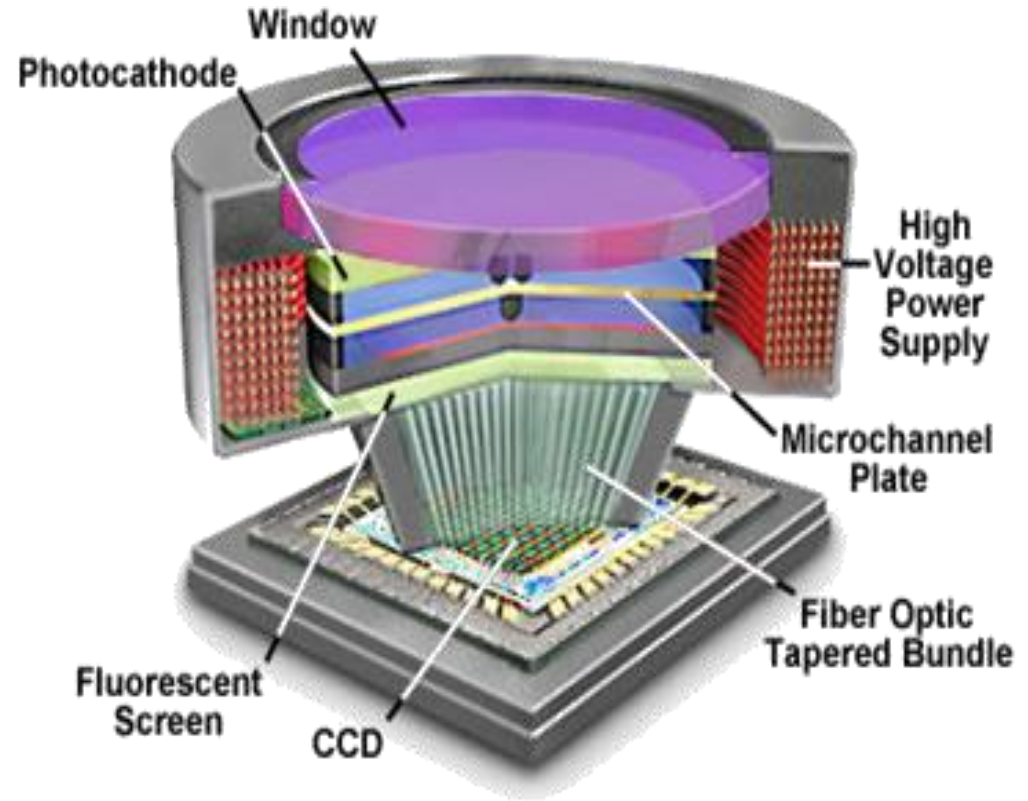
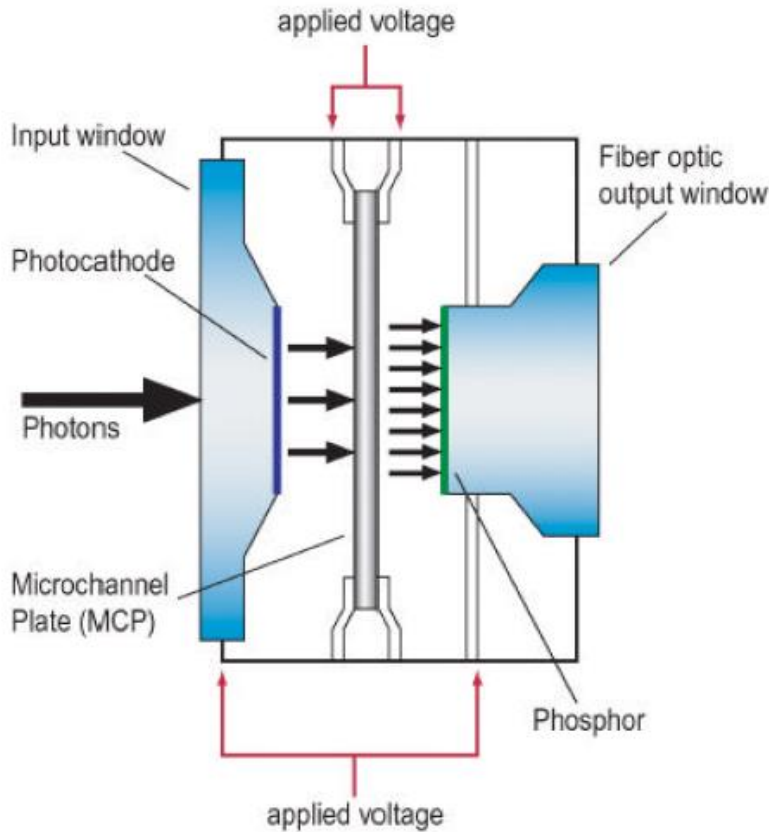


# MCP (II)



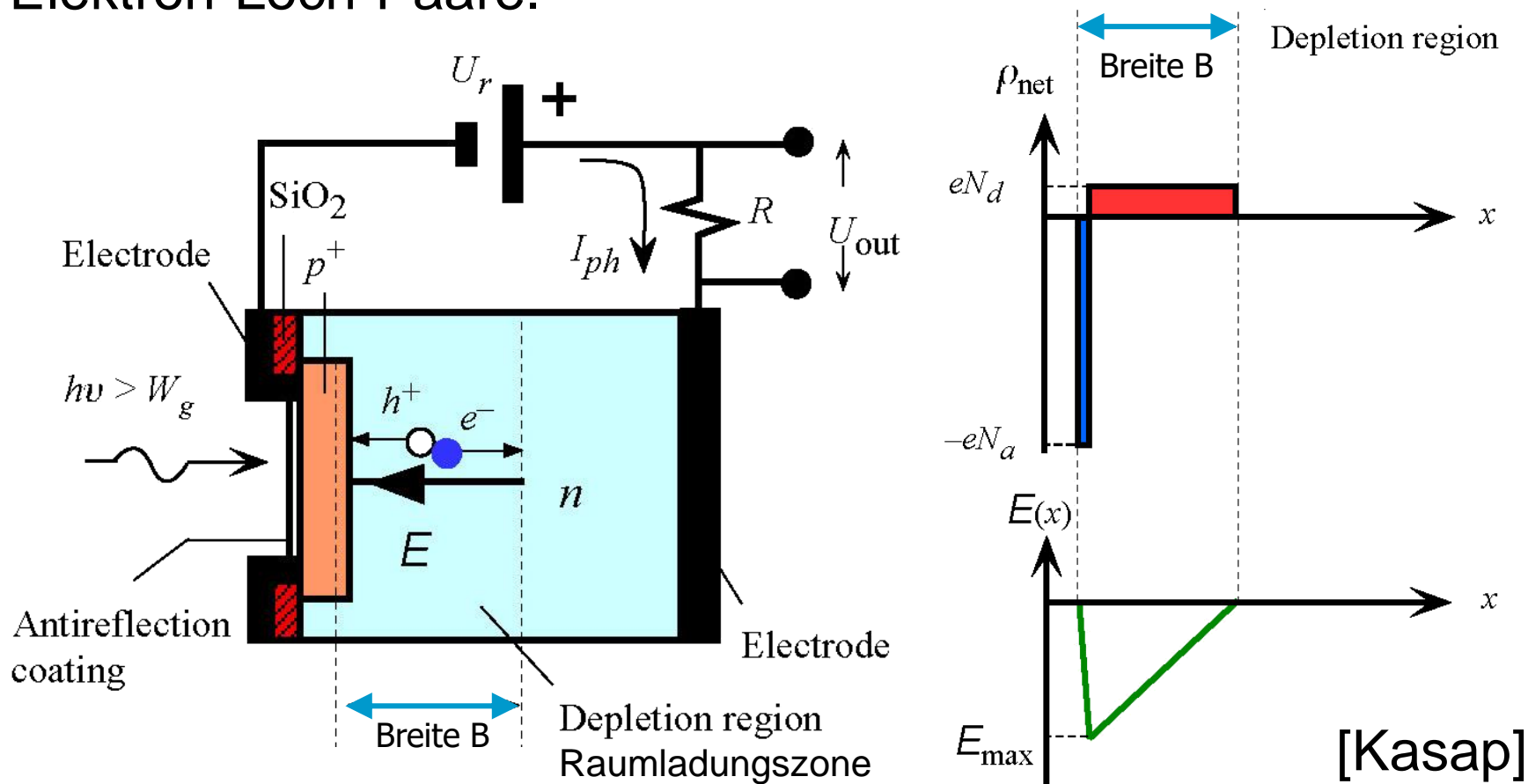
# MCP (III)

## Anwendungsbeispiele: Bildverstärker



# pn Photodiode

Halbleiter-Quantendetektor; Grundlage ist der innere photoelektrische Effekt: Einfallende Photonen generieren Elektron-Loch-Paare.



# Kennwerte

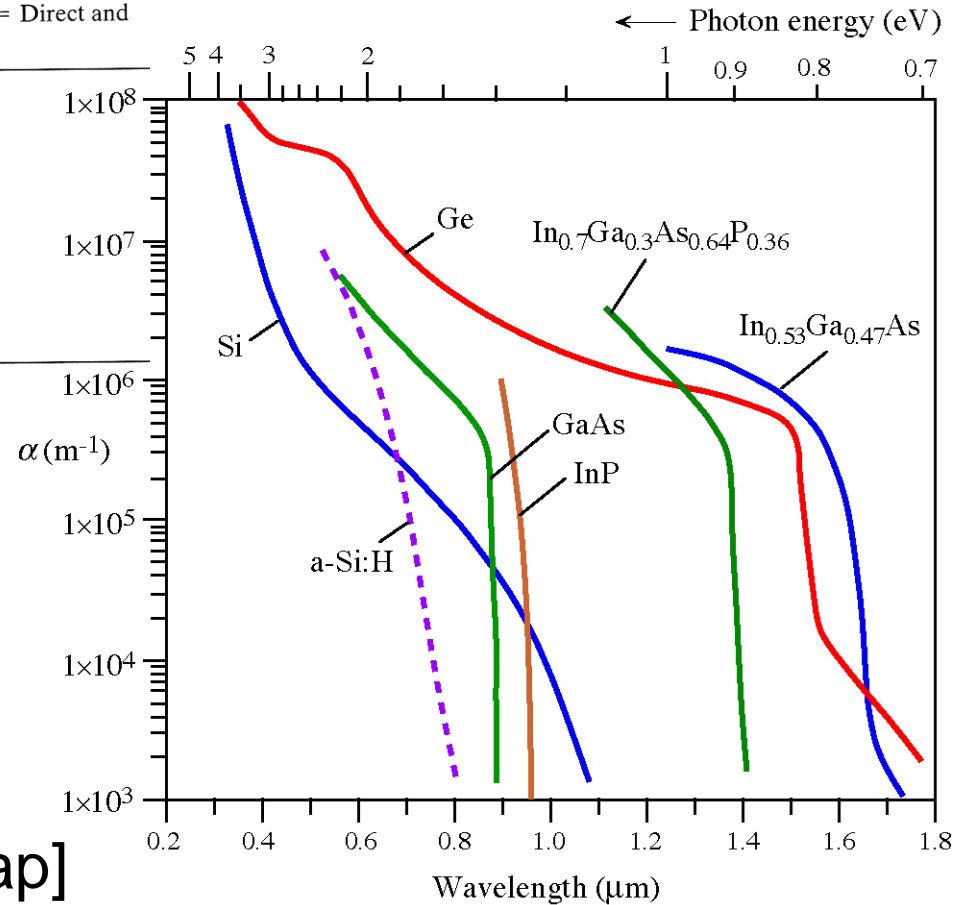
**Grenz-Wellenlänge:**

$$\lambda_g = \frac{hc}{W_g}$$

$\frac{1}{\alpha}$  ... penetration depth  $\delta$

TABLE 5.1 Band gap energy  $E_g$  at 300 K, cut-off wavelength  $\lambda_g$  and type of bandgap (D = Direct and I = Indirect) for some photodetector materials.

Semiconductor	$E_g$ (eV)	$\lambda_g$ ( $\mu\text{m}$ )	Type
InP	1.35	0.91	D
GaAs <sub>0.88</sub> Sb <sub>0.12</sub>	1.15	1.08	D
Si	1.12	1.11	I
In <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> As <sub>0.64</sub> P <sub>0.36</sub>	0.89	1.4	D
In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	0.75	1.65	D
Ge	0.66	1.87	I
InAs	0.35	3.5	D
InSb	0.18	7	D



**Absorptionskoeffizient  $\alpha$ :**

Lichtintensität im Halbleiter

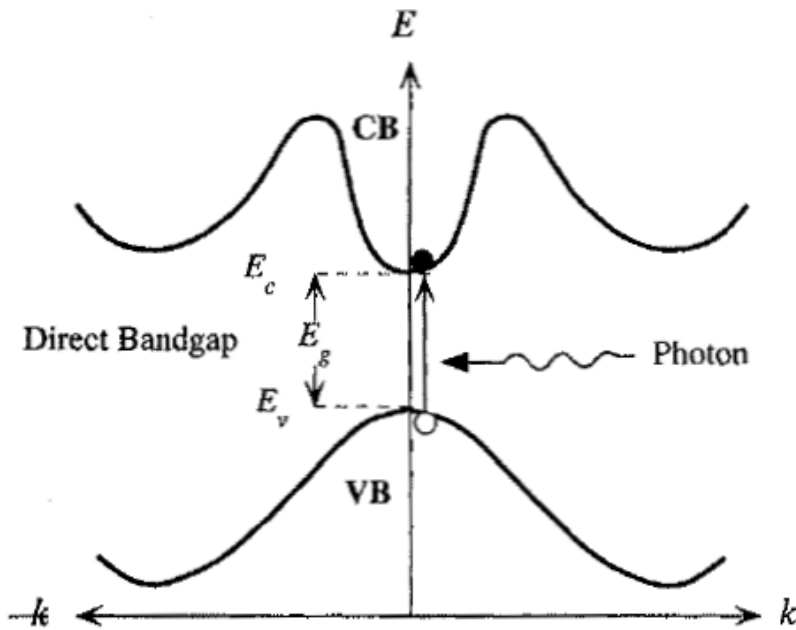
$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

[Kasap]

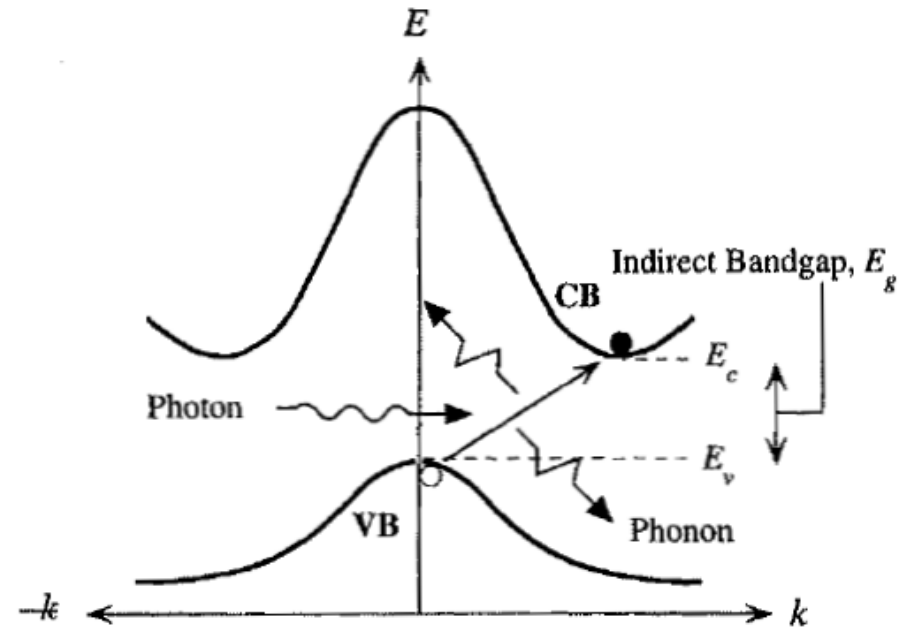
# Direct vs. Indirect Bandgap

Direct (D): Photon  $\rightarrow$  Elektron vom Valenz- in das Leitungsband

Indirect (I): Photon  $\rightarrow$  Phonon (Gitter-Vibration)  $\rightarrow$  Elektron



(a) GaAs (Direct bandgap)



(b) Si (Indirect bandgap)

**FIGURE 5.4** (a) Photon absorption in a direct bandgap semiconductor. (b) Photon absorption in an indirect bandgap semiconductor (VB, valence band; CB, conduction band)

[Kasap]

# Kennwerte (II)

## Quanteneffizienz (QE):

$$\eta = \frac{\# \text{ generierter freier Elektronen-Loch Paare}}{\# \text{ einfallender Photonen}} = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu}$$

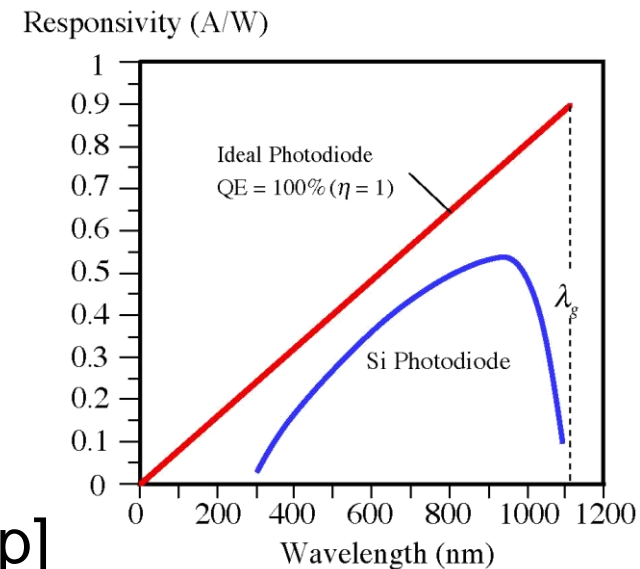
## Spektrale Empfindlichkeit (Responsivity):

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \eta \frac{e}{hf} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \text{ mit } [\mathcal{R}] = A/W$$

$I_{ph}$  ... photocurrent [A]

$P_{opt}$  ... incident optical power [W]

[Kasap]





# Kennwerte (III)

## Anstiegszeit (Risetime) $t_r$ :

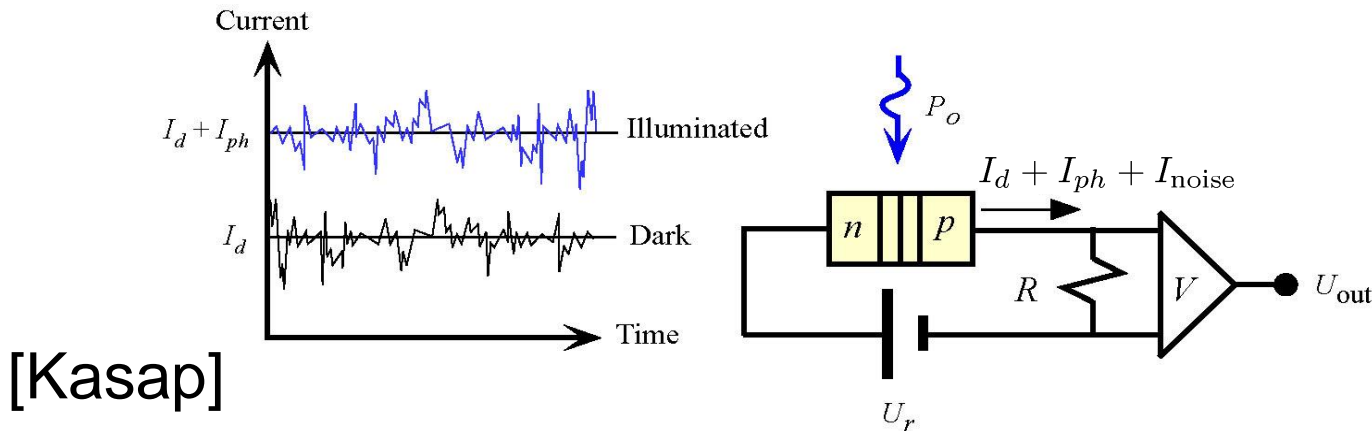
Zeitdauer für den Anstieg des Photostroms  $I_{ph}$  von 10% auf 90% des Endwertes bei optischer Sprung-Erregung ( $P_{opt}: 0 \rightarrow P_{opt,enn}$ )

## Grenzfrequenz (cutoff frequency):

$$f_{g,3dB} \approx \frac{0.35}{t_r}$$

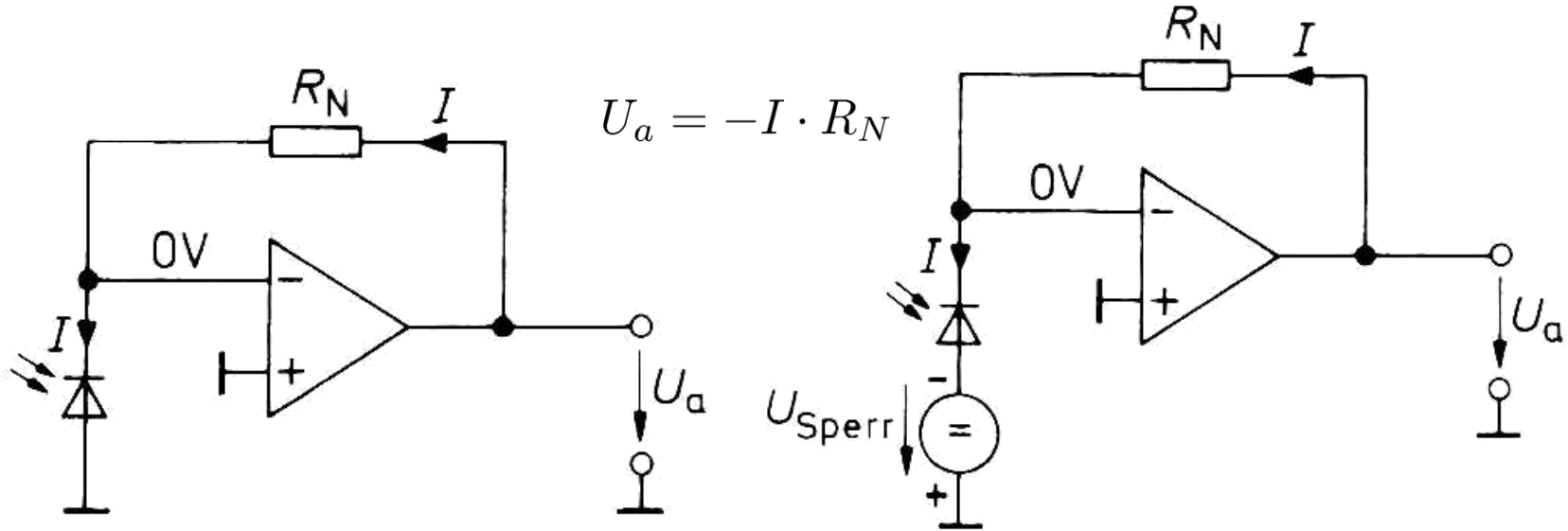
## Dunkelstrom $I_d$ :

Stromfluß durch rein thermisch generierte Elektronen-Loch-Paare.



[Kasap]

# Schaltungsbeispiele



... Betrieb im Kurzschluss (SNR >)

... Betrieb in Sperrrichtung ( $t_r <, f_g >$ )

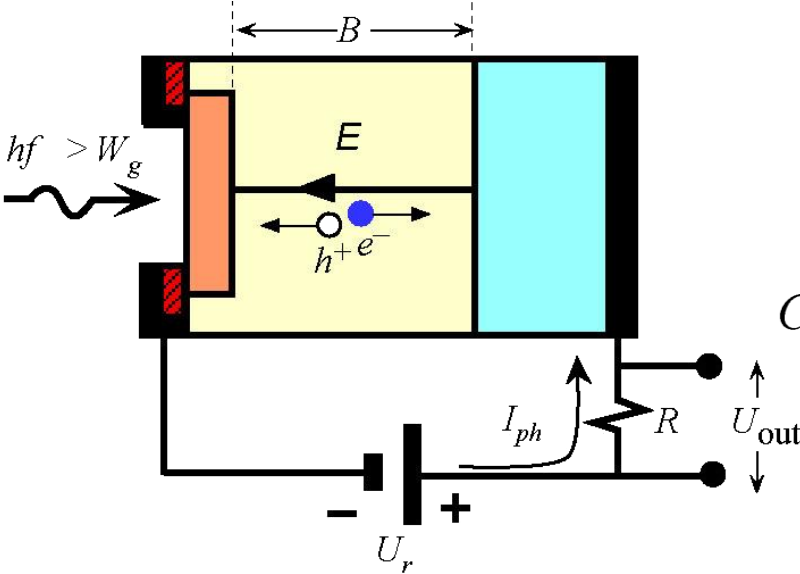
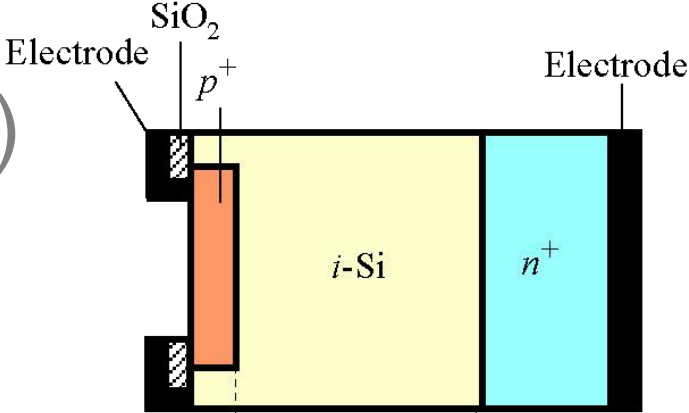
# Nachteile der pn PD

Schmale RLZ führt zu:

1. Hohe Sperrschichtkapazität  $\Rightarrow$  niedrige Grenzfrequenz
2. Lange Wellenlängen haben eine zu große Eindringtiefe, generieren E-L Paare außerhalb der RLZ  $\Rightarrow$  geringe QE  $\eta$

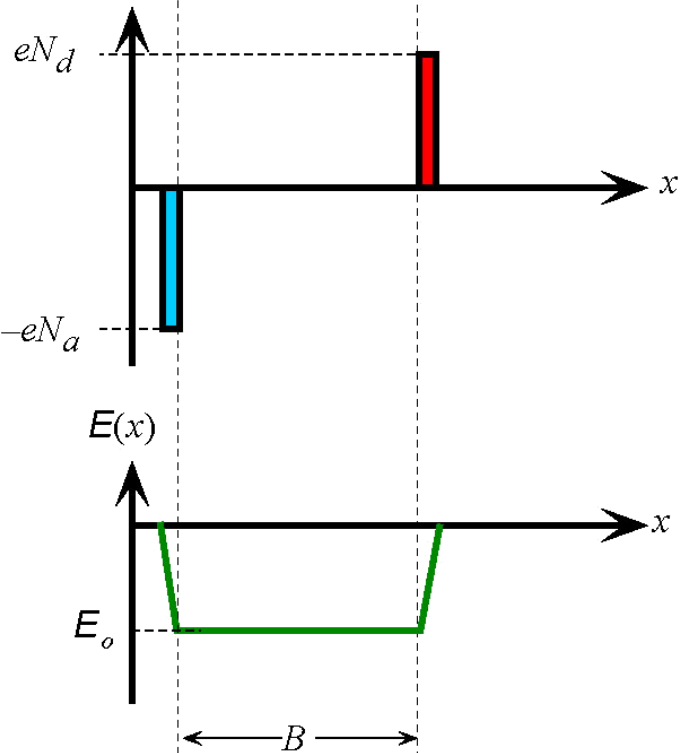
Abhilfe durch Verbreitern der RLZ  $\rightarrow$  pin PD

# pin-Photodiode (p-intrinsic-n)



$$C_{RLZ} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{B}$$

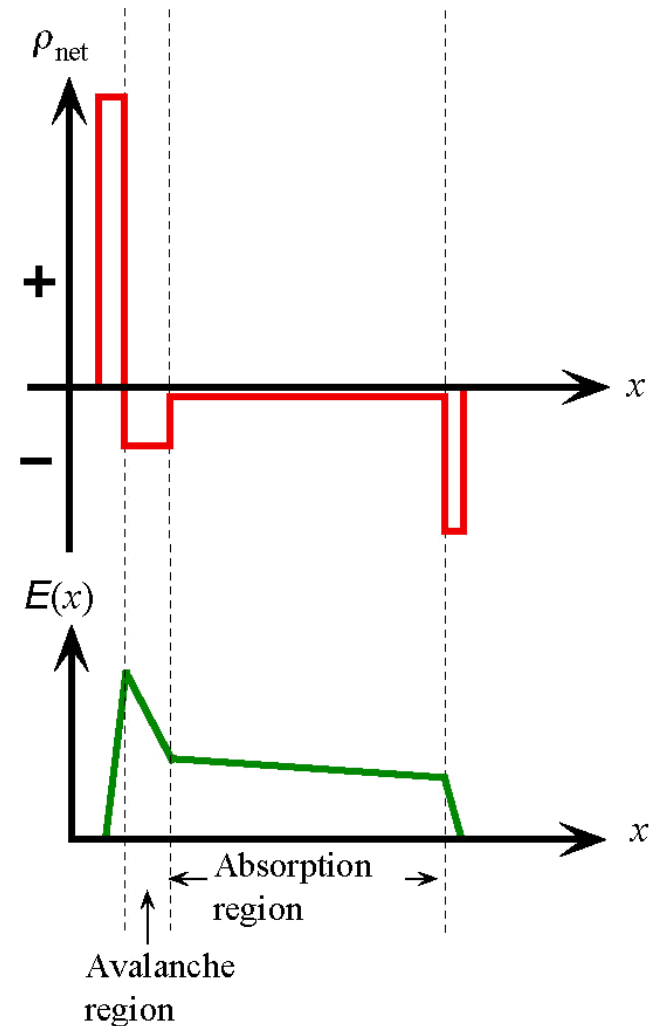
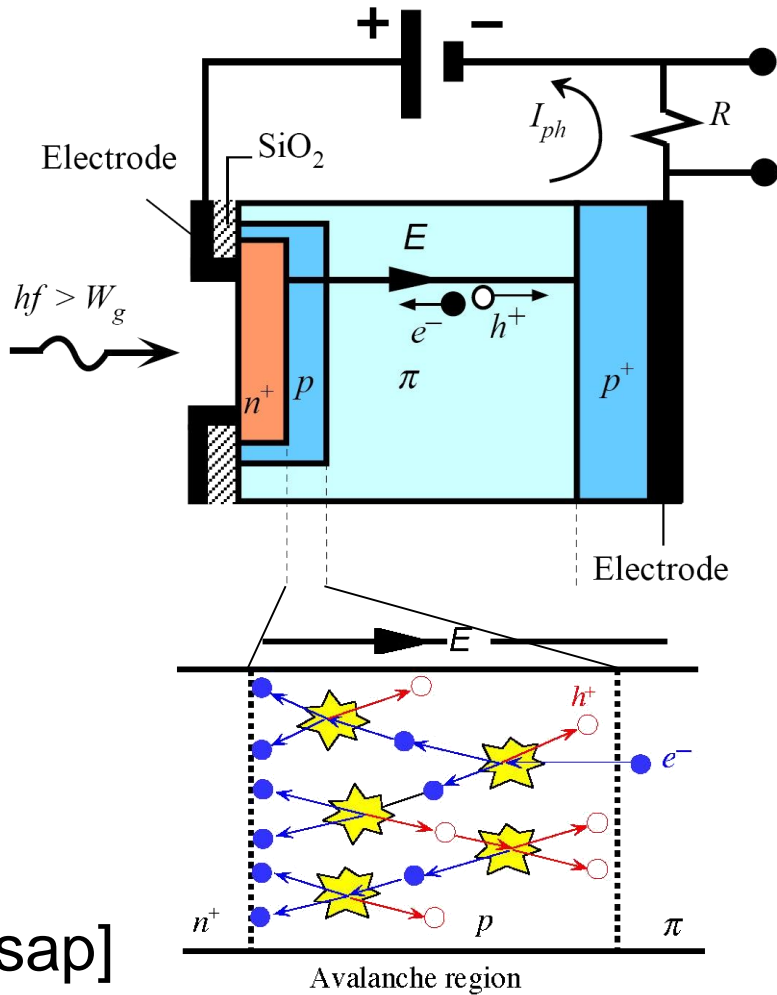
$$E \approx \frac{U_r}{B}$$



[Kasap]

# Avalanche-Photodiode (APD)

pin PD mit Lawineneffekt → Verstärkung



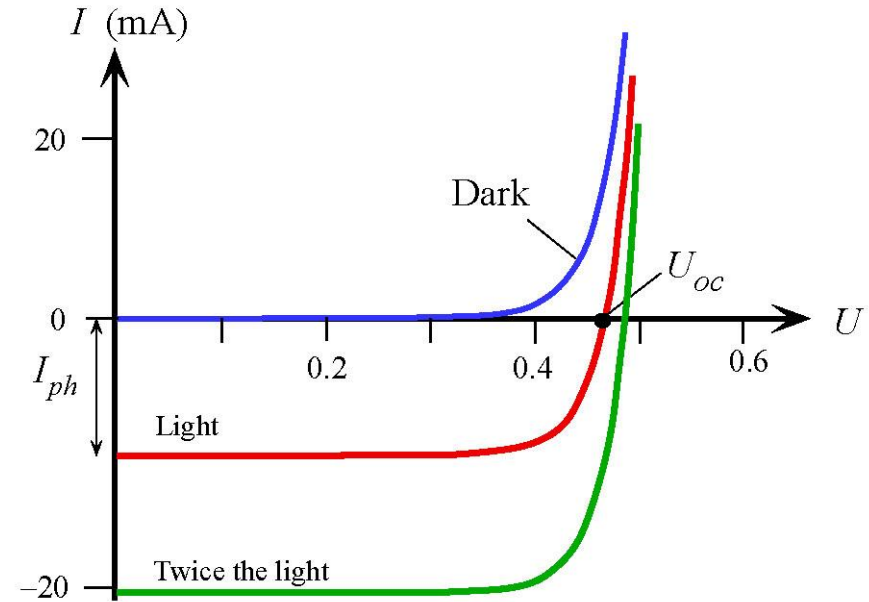
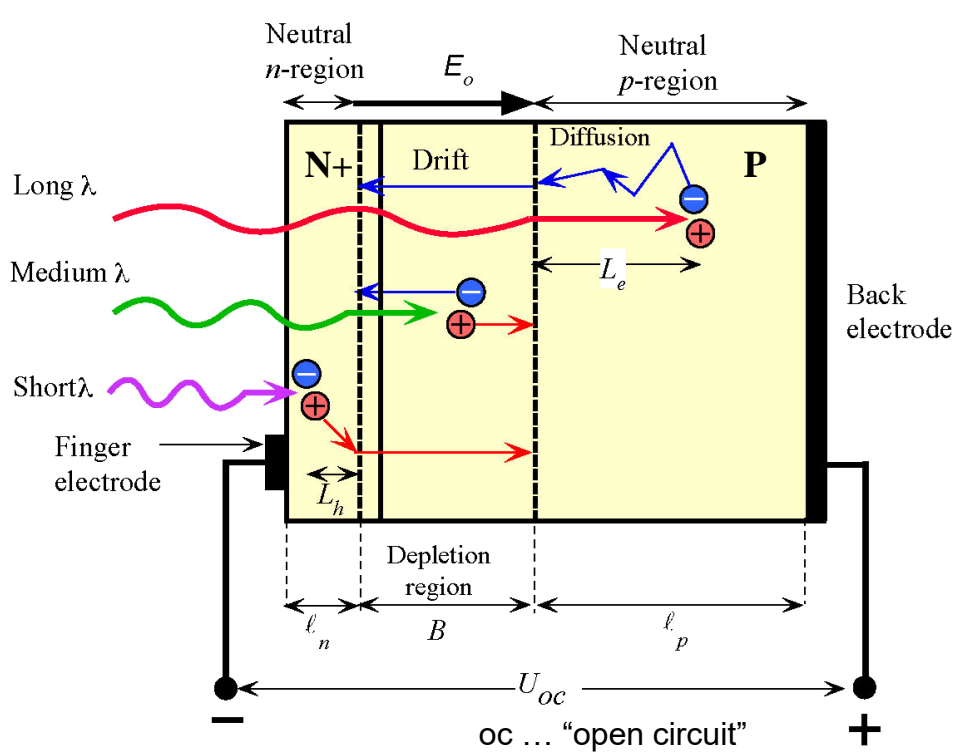
[Kasap]

# Vergleichstabelle

Photodiode	$\lambda_{\text{range}}$ nm	$\lambda_{\text{peak}}$ nm	$R$ at $\lambda_{\text{peak}}$ A/W	Gain	$t_r$ (ns)	$I_{\text{dark}}$
Si <i>pn</i> junction	200–1100	600–900	0.5–0.6	<1	0.5	0.01–0.1 nA
Si <i>pin</i>	300–1100	800–900	0.5–0.6	<1	0.03–0.05	0.01–0.1 nA
Si APD	400–1100	830–900	40–130	10–100	0.1	1–10 nA
Ge <i>pn</i> junction	700–1800	1500–1600	0.4–0.7	<1	0.05	0.1–1 $\mu$ A
Ge APD	700–1700	1500–1600	4–14	10–20	0.1	1–10 $\mu$ A
InGaAs-InP <i>pin</i>	800–1700	1500–1600	0.7–0.9	<1	0.03–0.1	0.1–10 nA
InGaAs-InP APD	800–1700	1500–1600	7–18	10–20	0.07–0.1	10–100 nA

[Kasap]

# Photoelement (Solarzelle)



$$I = -I_{ph} + I_0 \left( e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right)$$

Kurzschluss  $U=0$ :

$I = K \cdot P_{opt} / A_{Det}$  ... einfache Verschaltung, langsam

**VT**: Dunkelstrom eliminiert → Stromrauschen reduziert!

SNR besser, Detektor ist langsamer

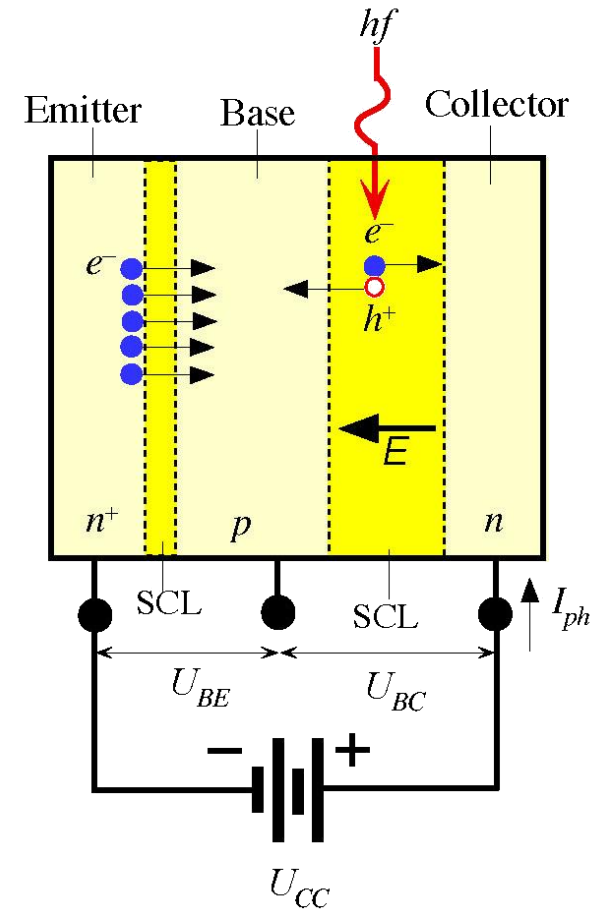
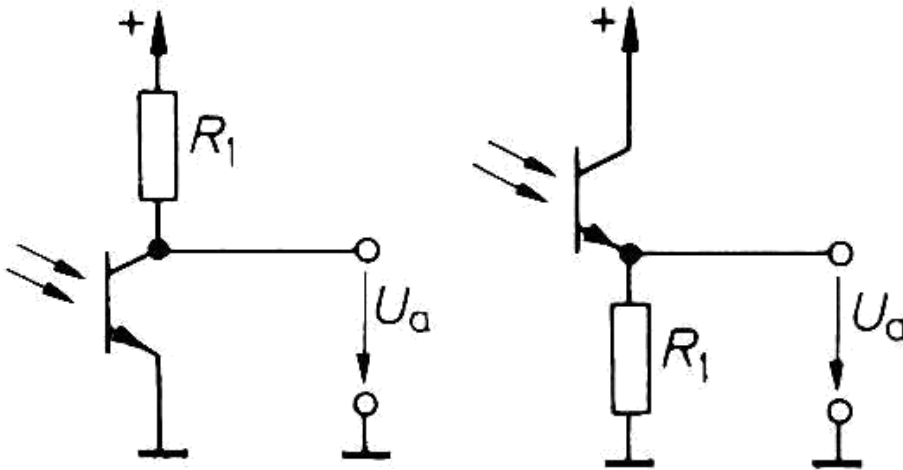
[Kasap]

# Phototransistor

Verstärkung:  $I_{ges} \approx \beta I_{ph}$

NT: Rauschen, Geschwindigkeit

Schaltungsbeispiele:



SCL ... space charge layer

[Kasap]



# Photowiderstand Light Dependent Resistor (LDR)

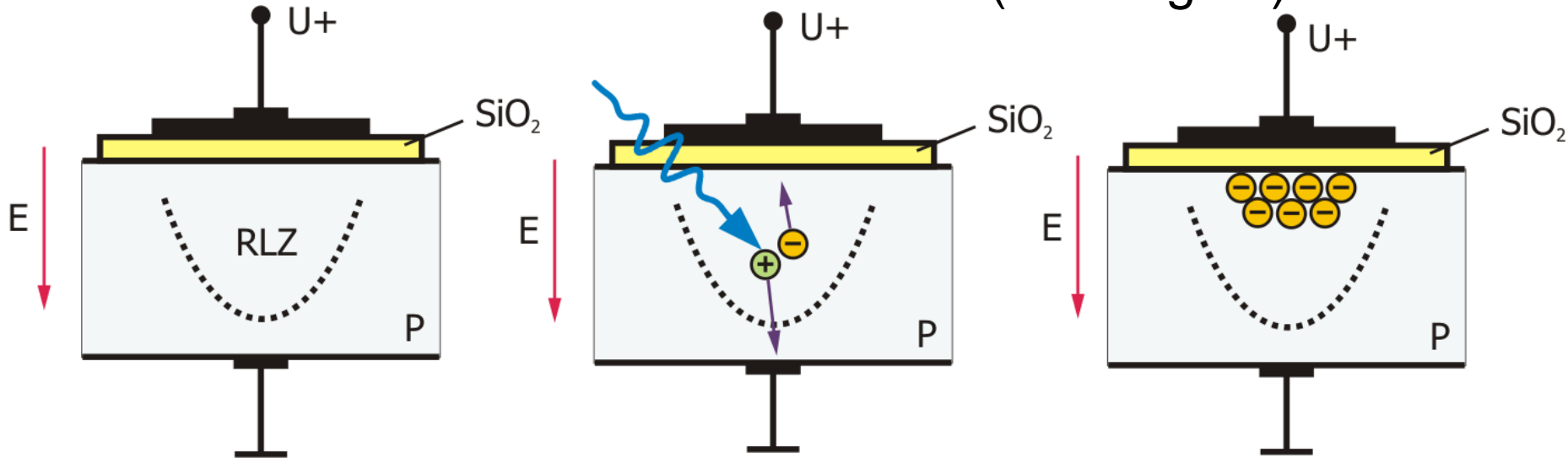


Grundlage ist auch der innere photoelektrische Effekt:

- Freisetzung von Ladungsträgern im Inneren eines Materials (Halbleiter mit VB und CB)
- Leitwert  $G$  ändert sich proportional zur Licht-Intensität (Bestrahlungsstärke  $E$ ):  $G \sim E^\gamma$  mit  $\gamma = 0,7 \dots 1$
- Träge Sensoren
- Irreversible Alterung
- + Polaritätsunabhängig, auch mit Wechselstrom betreibbar

# CCDs – Charge Coupled Devices

- Erfunden 1970 (Boyle&Smith)
- Grundelement: MOS-Kondensator (Photo-gate)



... Ausbildung einer Ladungsträgerfreien Zone (RLZ)

... Elektronen-Lochgeneration ( $hf > W_g$ ), Separation durch E

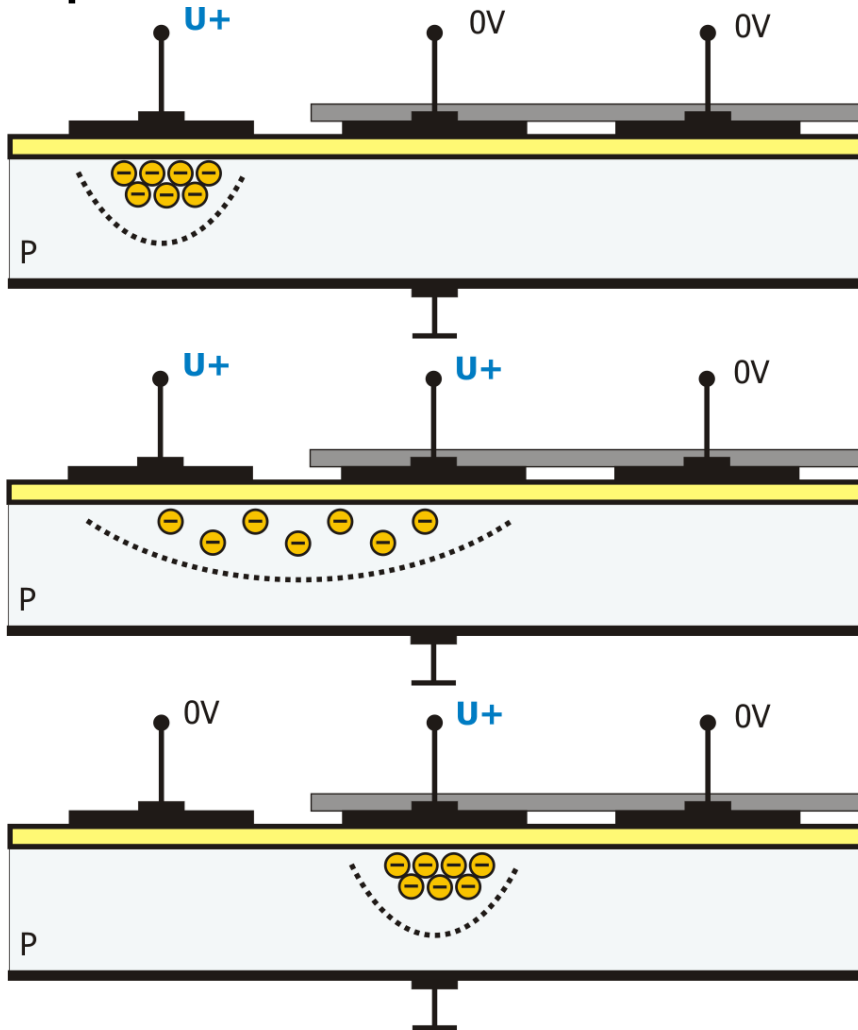
... sammeln der freien Elektronen an Oxidschicht  $Q \sim n \cdot h \cdot f$

Vermeidung der lateralen Diffusion: Seitliche Eingrenzung der RLZ

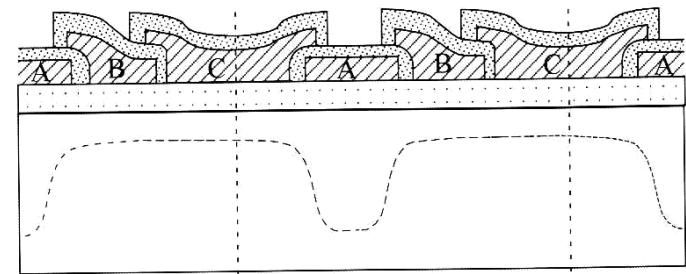
# CCD-Pixel und Ladungstransfer

## Bsp.: 3-Phasen CCD-Pixel

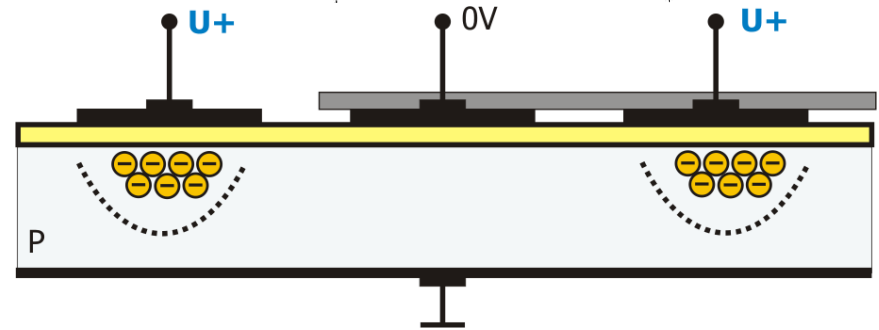
... nur 33% der Chipfläche für photoaktives CCD-Element



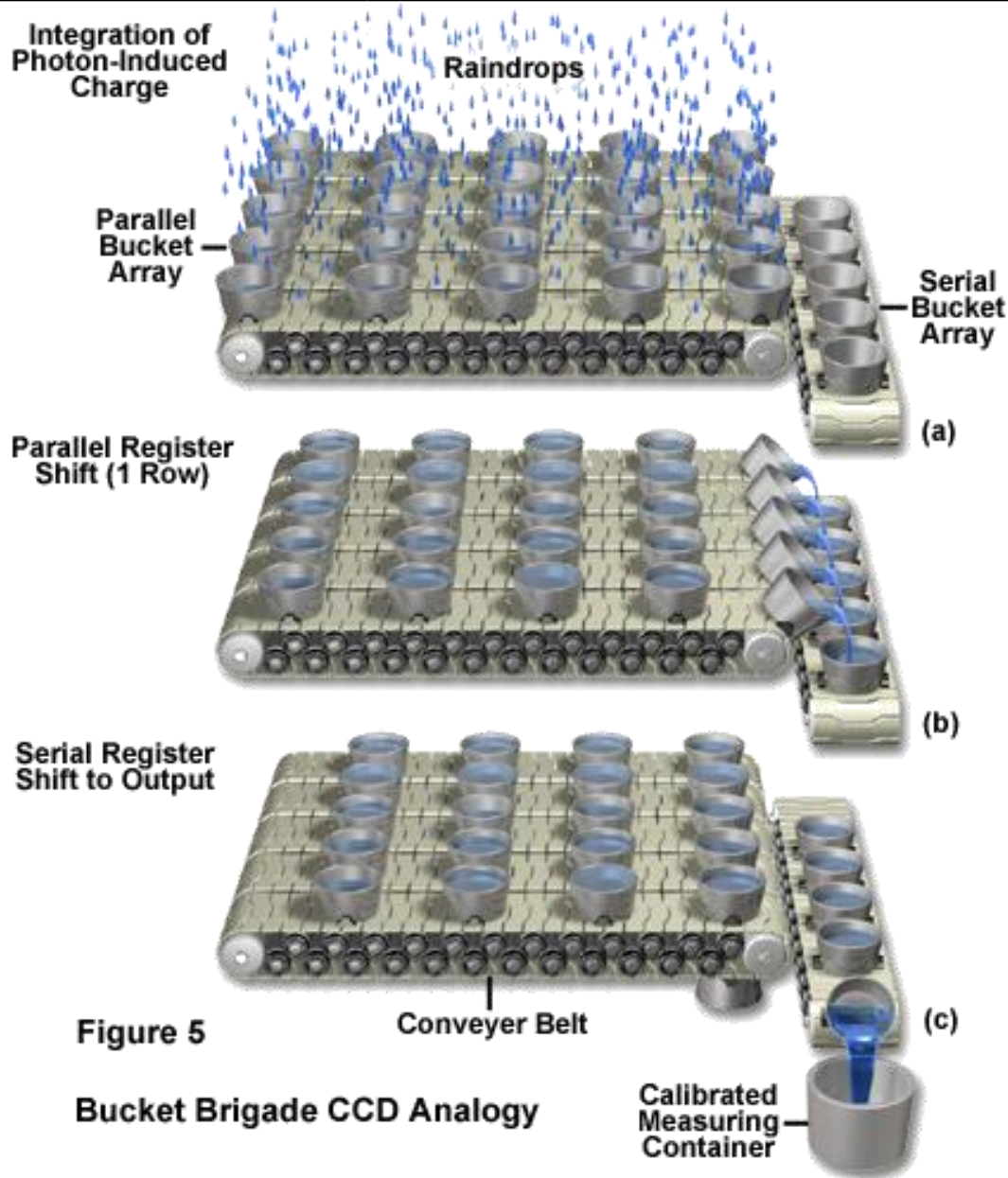
- Depletion region boundary - - - -
- Polysilicon gates
- Insulation layer between gates
- Gate oxide



← One Pixel →

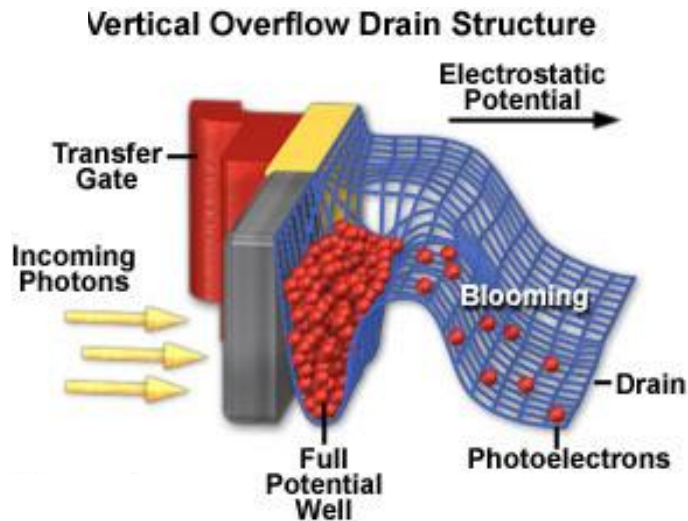


# CCD-Arrays



# Effekte bei CCD-Sensoren

- Pixelüberlauf (Blooming)
  - Lichtintensität/Integrationszeit
  - Während der Belichtung

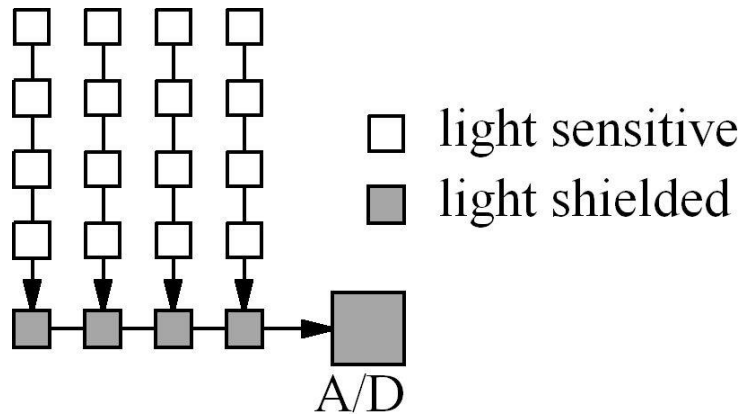


[<https://de.wikipedia.org/wiki/Smear>]  
 Smear (senkrechter, weißer Strich unter der Lichtquelle).  
 Hier ebenfalls zu sehen: Blooming

- Verschmiereffekt (Smearing)
  - Verschmiereffekt durch Belichtung beim Ladungstransport
  - Full-Frame-CCD, Frame-Transfer-CCD

# Ladungstransport

## 1. Full Frame Sensor

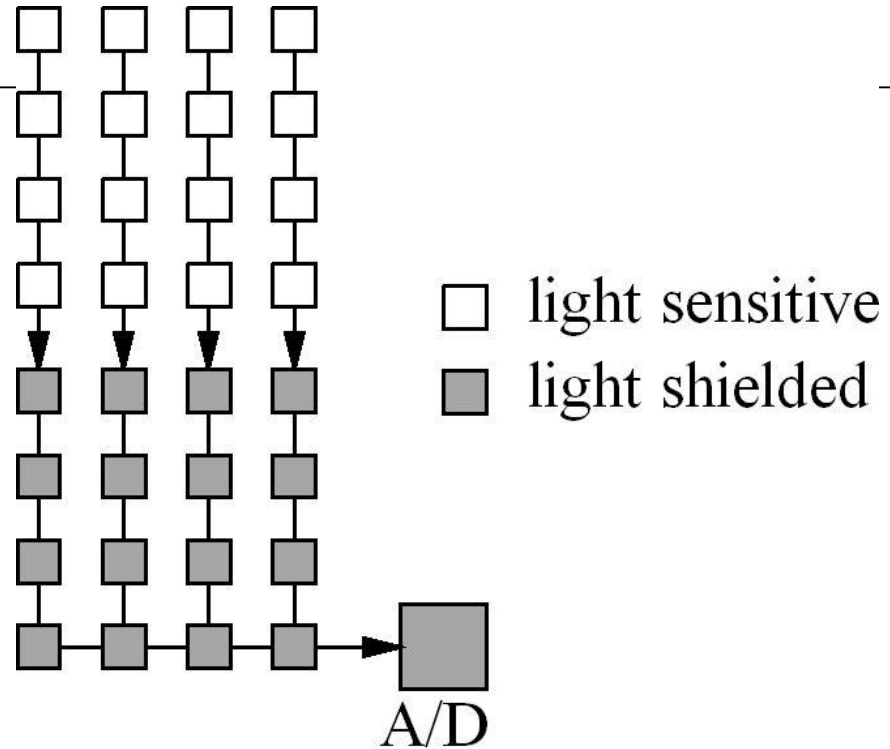


- Verschmier-Effekte durch Nachbelichtung während Auslesen (→ mechanischer shutter nötig!)
- Gute Chip-Ausnutzung und optimaler Füllfaktor F

# Ladungstransport (II)

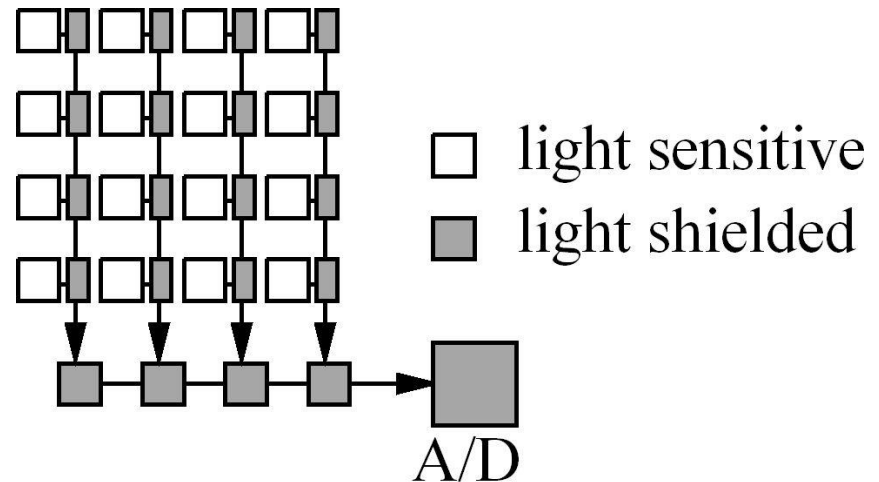
## 2. Frame Transfer Sensor (FT-CCD)

- kein mechan. shutter nötig,
- Guter Füllfaktor
- Verschmier-Effekt



## 3. Interline Transfer Sensor (IT-CCD)

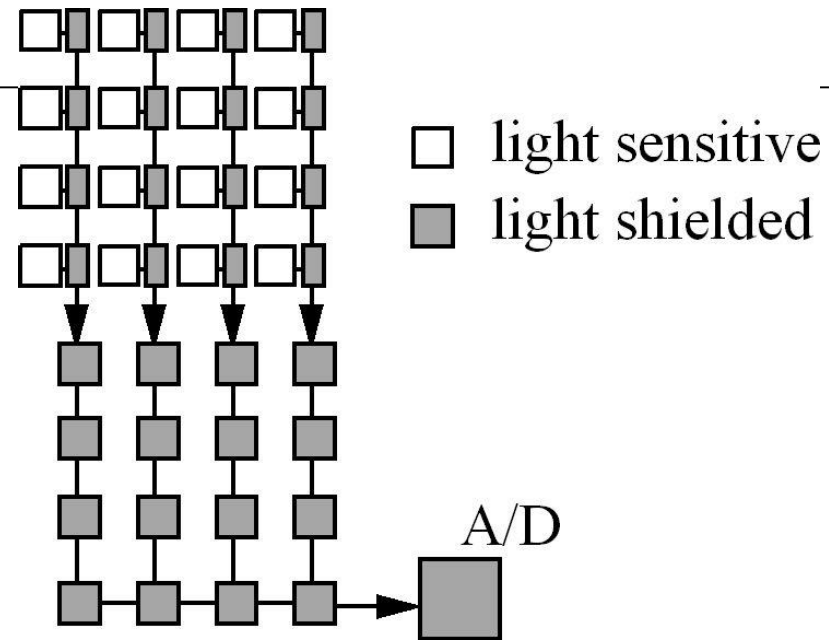
- „elektron. shutter“
- Kein mechan. shutter nötig
- Schlechter Füllfaktor
- Wenig Verschmier-Effekt



# Ladungstransport (III)

## 4. Interline-Frame Transfer Sensor (IFT-CCD)

- kein mechan. shutter nötig
- Schlechter Füllfaktor
- Kaum Verschmier-Effekt



Charge Transfer Efficiency in CCDs

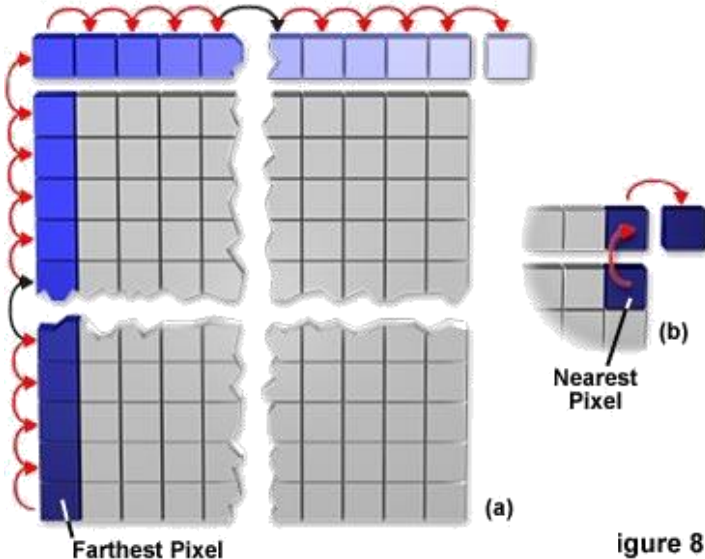


Figure 8

## Transfer-Effizienz

- Essentieller Parameter für CCD-Sensor (Kritisch!)
- Liegt typischerweise bei 99.999% (1024x1024 Pixel: Faktor 0.98)
- **Buried-Channel-CCDs**



# CCD Eigenschaften

- Quanteneffizienz  $\eta_{\text{CCD}} \sim 40\% - 90\%$
- Geringes Rauschen (Hauptquelle: Ausgangsverstärker)
- Hoher Füllfaktor (80% bis fast 100%)

- Großer Dynamikbereich

Bsp.: 6.4x6.4 $\mu\text{m}$  CCD-Pixel:

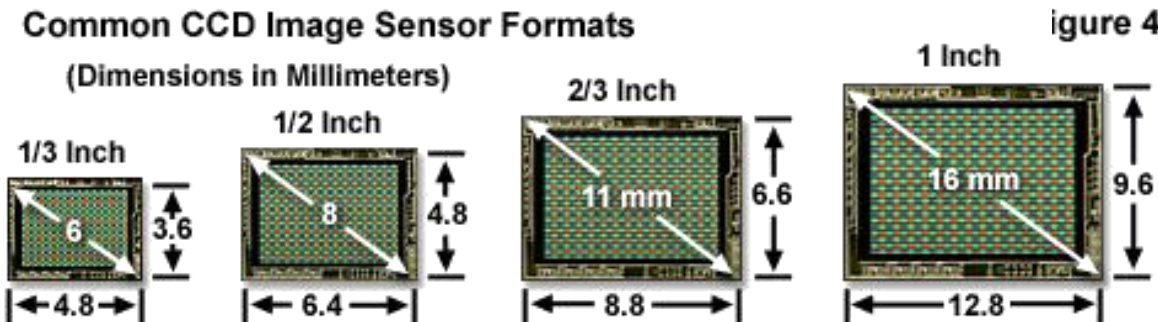
- Kapazität  $\sim 45000e^-$ ,
- Rauschen  $10e^-$  @1MHz

$$A_{\text{Dynamik}} = 20 \log_{10} \frac{\text{Elektronenkapazität je Pixel}}{\# \text{ Rauschelektronen}}$$

... typisch bis 60dB, 70dB

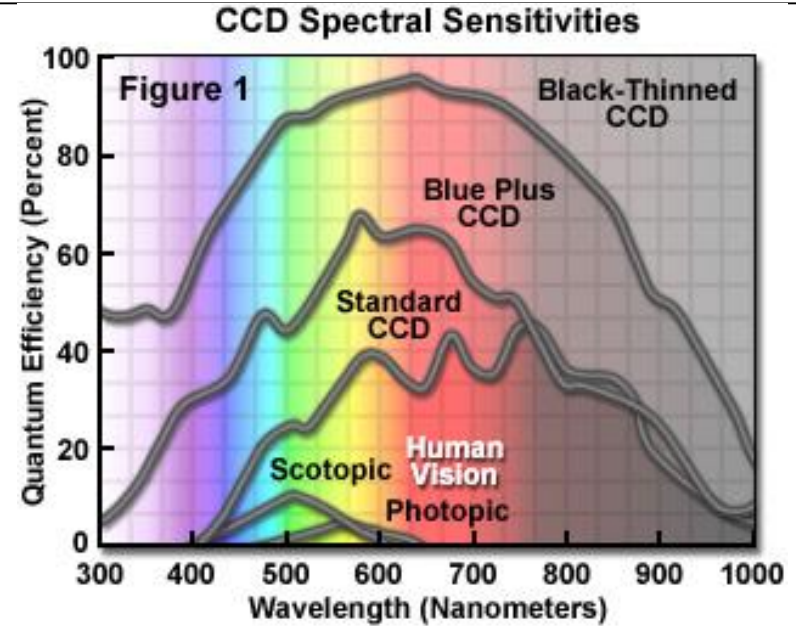
- Große Arrays verfügbar ( $1024^2 - 8192^2$ )

Bit Depth	Grayscale Levels	Dynamic Range (Decibels)
1	2	6 dB
2	4	12 dB
3	8	18 dB
4	16	24 dB
5	32	30 dB
6	64	36 dB
7	128	42 dB
8	256	48 dB
9	512	54 dB
10	1,024	60 dB
11	2,048	66 dB
12	4,096	72 dB
13	8,192	78 dB
14	16,384	84 dB
16	65,536	96 dB
18	262,144	108 dB
20	1,048,576	120 dB

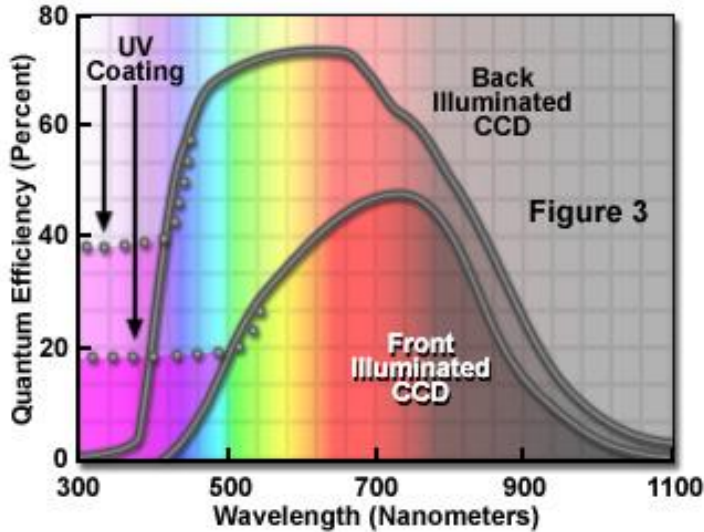


# CCD-Eigenschaften (II)

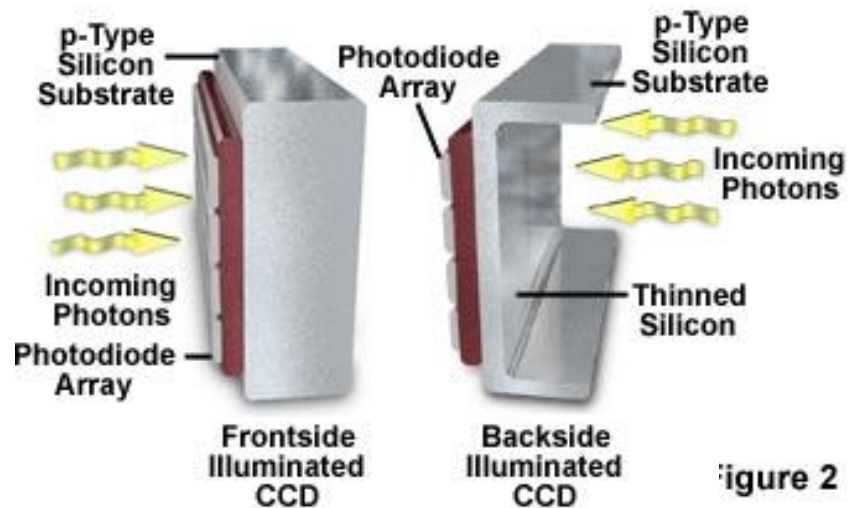
- Spektrale Eigenschaften
- Quanteneffizienz  $\eta_{\text{CCD}}$ 
  - bauformabhängig
  - Front-Illuminated (billig) vs.
  - Back-Illuminated (Black-Thinned)
  - $\eta_{\text{Scot}} \sim 10\%$ ,  $\eta_{\text{Phot}} \sim 3\%$ ,  
 $V(\lambda)$   $V(\lambda)$



Frontside and Backside CCD Quantum Efficiency



Frontside and Backside Illuminated CCDs



# CCD-Eigenschaften (III)

- Füllfaktor  $F$ 
  - Verhältnis aktive Pixelfläche zur gesamten Pixelfläche
  - bei CCDs 60% bis fast 100%

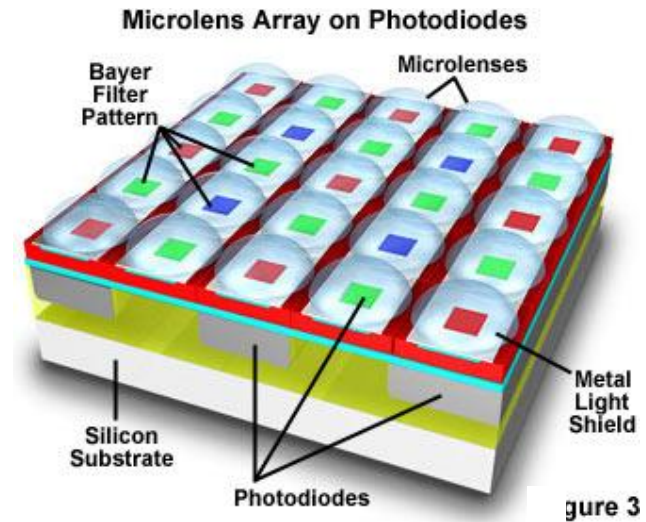
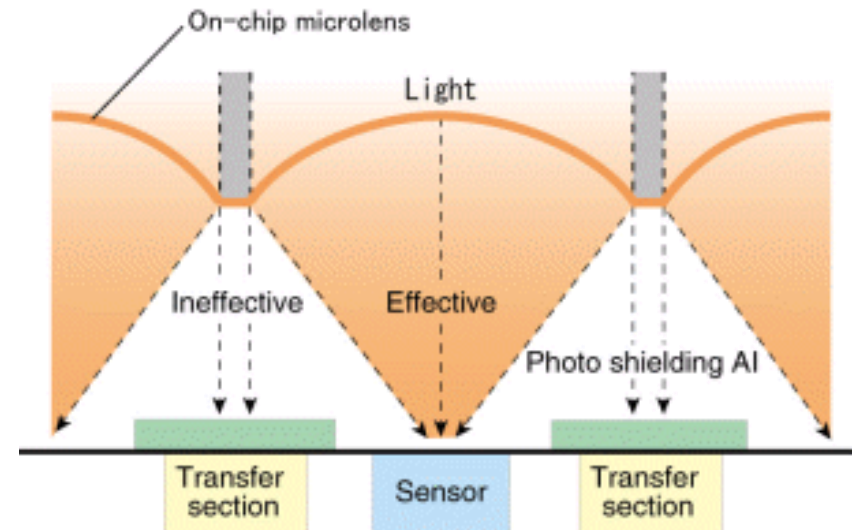
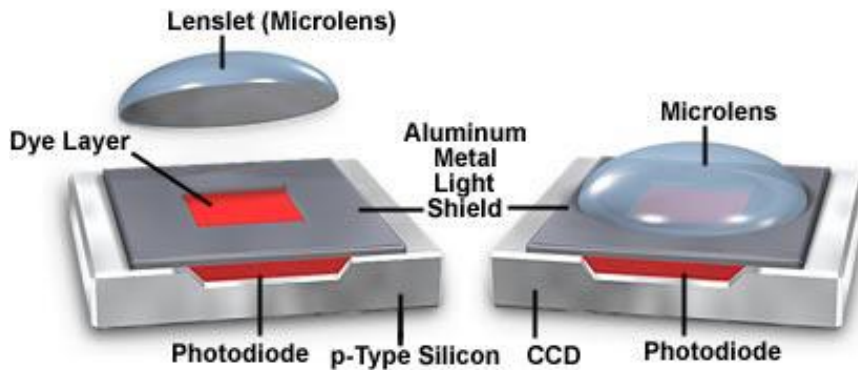


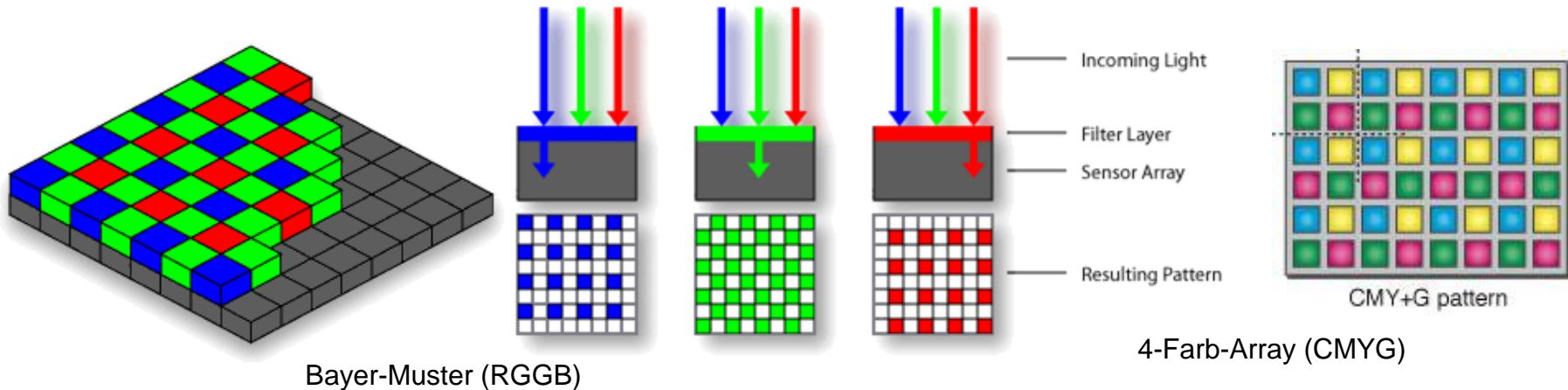
Figure 3

- Verbesserung der Lichtausbeute: Mikrolinsen

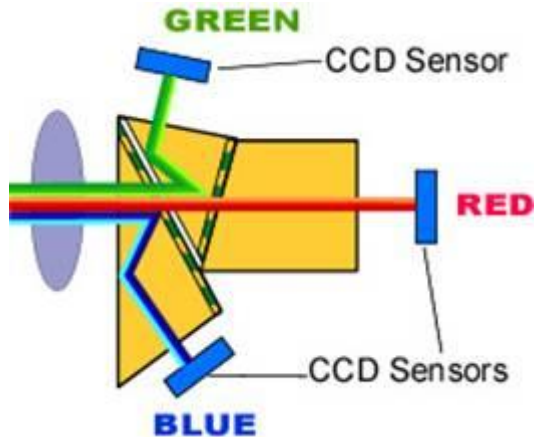


# Farbempfindliche CCD-Sensoren

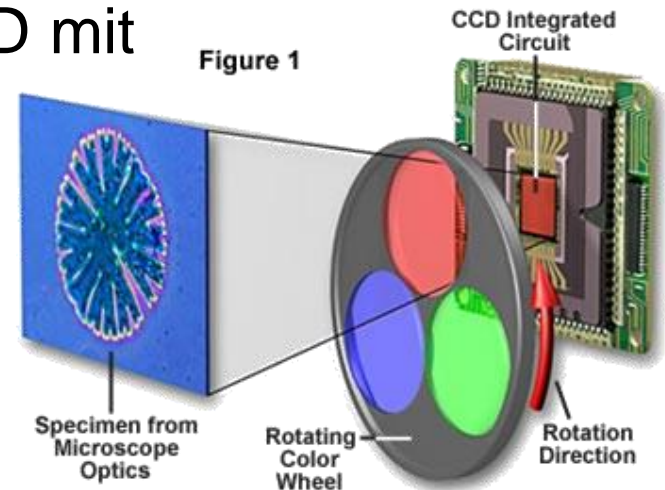
- Farbfilter-Muster vor Pixel-Array



- 3-CCD-Chip:



- Single-CCD mit Filter-Rad:



# Color Filter Types (1)

R	G	B	R	G
R	G	B	R	G
R	G	B	R	G
R	G	B	R	G
R	G	B	R	G

C	G	Y	C	G
C	G	Y	C	G
C	G	Y	C	G
C	G	Y	C	G
C	G	Y	C	G

R	G	B	G	R	G	B	G	R
R	G	B	G	R	G	B	G	R
R	G	B	G	R	G	B	G	R
R	G	B	G	R	G	B	G	R
R	G	B	G	R	G	B	G	R

Stripe color filters

R	G	R	G	R
G	B	G	B	G
R	G	R	G	R
G	B	G	B	G
R	G	R	G	R

R	G	R	G	R
G	R	G	B	G
R	G	R	G	R
G	B	G	R	G
R	G	R	G	R

C	G	W	G	W	G	C	W	C
W	G	W	G	C	W	C	G	W
W	G	C	W	C	G	W	G	W
C	W	C	G	W	G	W	G	C
C	G	W	G	W	G	C	W	C

Mosaic color filters



Bryce Bayer  
1929-2012

[Solid State Imaging, *P.Seitz*;  
In Handbook of Computer Vision  
and Applications  
Eds. B. Jähne, H. Haußecker, P. Geißler  
Vol.1, Chap. 7, pp. 165-222]

**Figure 7.20:** Illustration of different color filter types for single-chip color sensors. The unit cell (basic arrangement of color filter patches that is periodically repeated on the image sensor) is shown as shaded rectangle: **a** primary color (RGB) stripe filter with  $3 \times 1$  unit cell; **b** complementary color (CGY) stripe filter with  $3 \times 1$  unit cell; **c** primary color (RGB) stripe filter with  $4 \times 1$  unit cell; **d** Bayer color mosaic filter with  $2 \times 2$  unit cell; **e** Bayer color mosaic filter with  $4 \times 4$  unit cell; **f** shift-8 color mosaic filter using complementary colors in an  $8 \times 4$  unit cell.

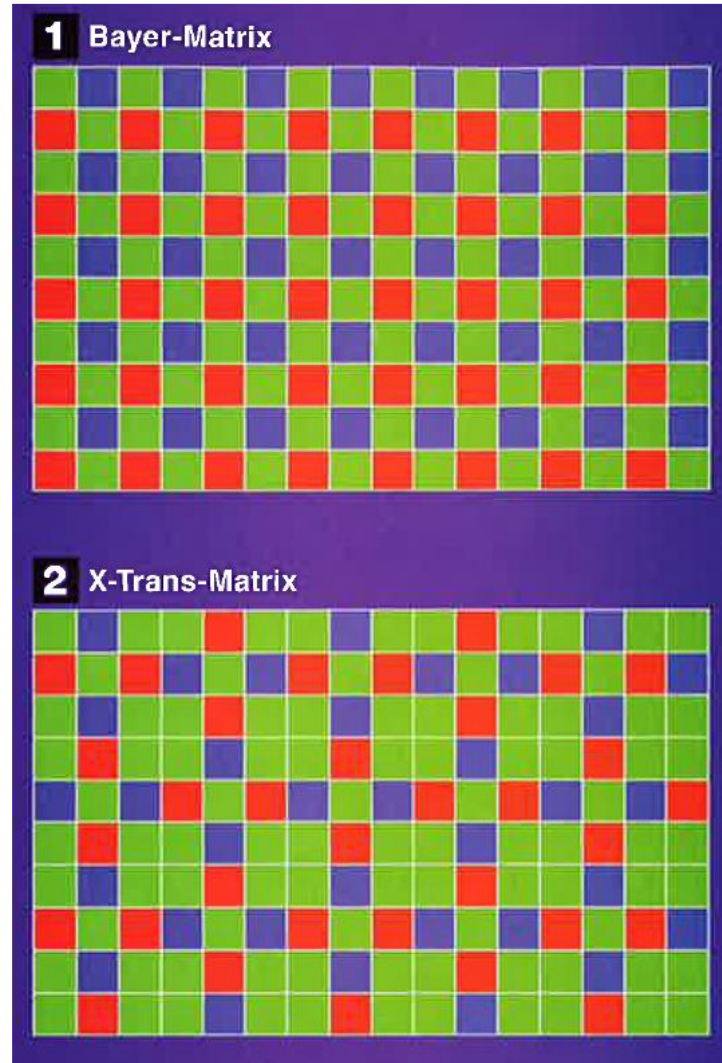
# Color Filter Types (2)

X-Trans:

Alle Grundfarben in jeder Zeile + Spalte

## Fujifilms X-Trans-Sensor

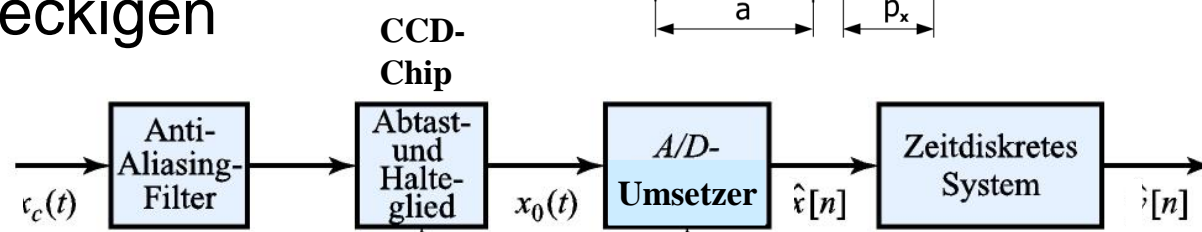
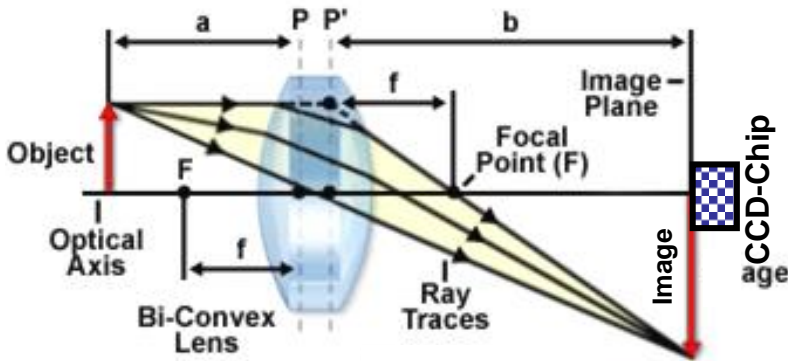
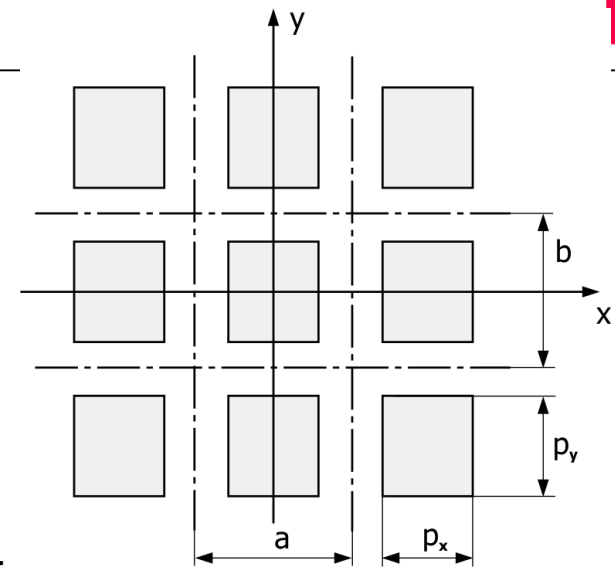
Der Aufbau des X-Trans-Sensors unterscheidet sich grundlegend von dem gewöhnlicher Kamerasensoren. Statt des üblichen Bayermusters (1) nutzt der X-Trans-CMOS eine andere, komplexere Farbfilteranordnung, bei der in jeder Zeile und Spalte statt nur 2 jeweils 3 Grundfarben vertreten sind (2). Auf diese Weise werden vor allem rote und blaue Linienpaare besser aufgelöst und Moiré-Effekte vermieden. Deshalb kann Fujifilm ohne größere Nebenwirkungen auf den Tiefpassfilter verzichten und die mit ihm verbundenen Verluste vermeiden.



24 COLORFoto 4/2017

# Pixelarray-Strukturen

- Rechteckige Pixel-Anordnung
  - Pixelabstand  $a, b$
  - Pixelgröße  $p_x, p_y$  (aktive Pixelfläche)
  - Füllfaktor  $= (p_x \cdot p_y) / (a \cdot b)$
- Sampling im rechteckigen Pixel-Gitter



$I_c(x_1, x_2)$  → **Analog Image** (Image of a virus)

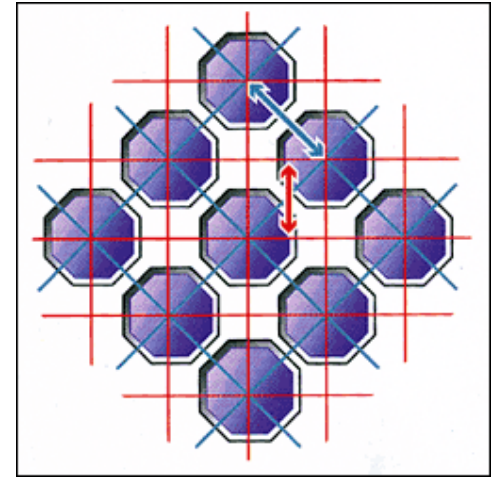
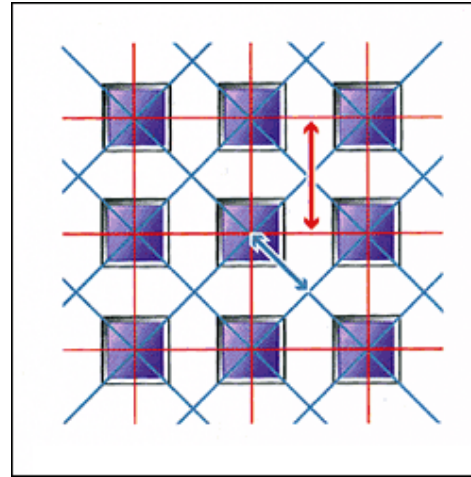
$I[n_1, n_2]$  → **Digital Sampling** (Grid of sampled pixels)

$\hat{I}[n_1, n_2]$  → **Pixel Quantization** (Table of quantized pixel values)

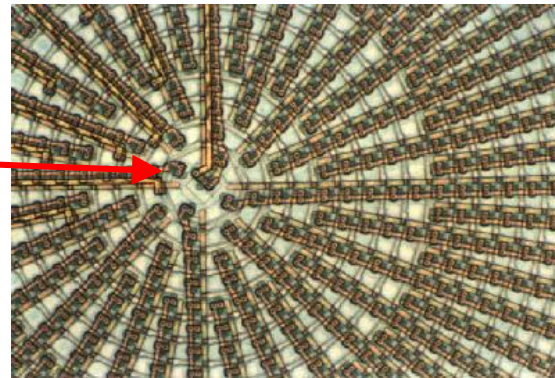
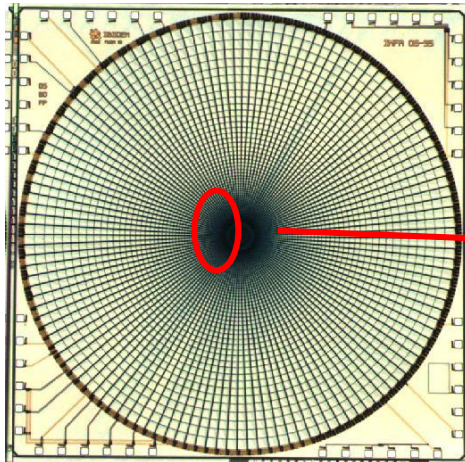
249	244	240	230	209	233	227	251	255
248	245	210	93	81	120	97	193	254
250	170	133	94	137	120	104	145	253
241	116	118	107	134	138	96	92	163
277	142	121	113	124	115	107	71	179
234	106	84	125	97	108	125	106	204
241	202	102	132	75	73	141	248	252
253	252	244	239	178	199	242	250	245
255	249	244	250	228	231	240	251	253

# Alternative Array-Strukturen

- Octagonale Anordnung (Super-CCD © Fujifilm)
  - Gewinn an Füllfaktor
  - Optimale Sampling-Dichte (2D-Auflösung)



- Unregelmäßige Anordnung: Giotto (Retina-like Camera)





## Nachteile von CCD-Sensoren

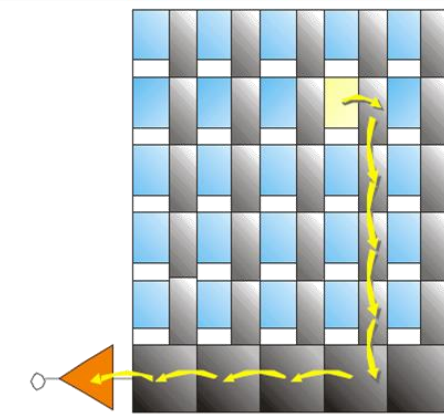
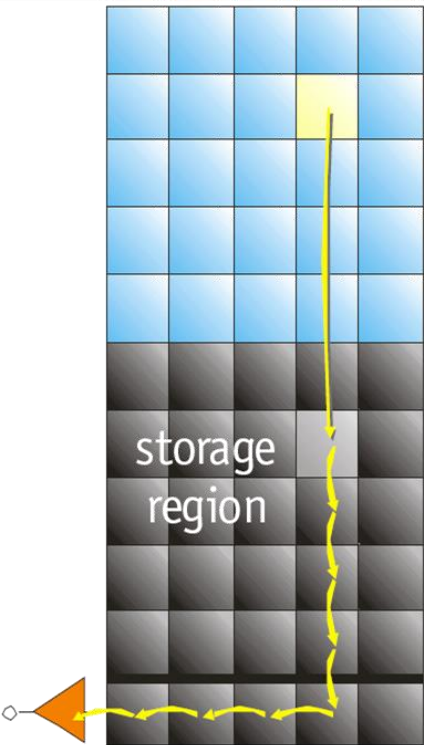
- Teuer (Aufwendige Fertigung, Ausschuss!)
- Relativ langsam (→ Ladungstransport)
- Gesamtes Bild muss ausgelesen werden (ROI!)
- Informationsverlust durch Transfereffizienz < 100%

Alternative: CMOS-Sensoren

# CMOS-Sensoren

- Technik basierend auf CMOS-Prozess
  - Aufbau des kompletten Sensors auf einem Chip
- Pixel-Array mit *wahlfreiem Zugriff*
  - Weiterentwicklung der Photodiodenarrays
  - *Verstärker* (Buffer) im Pixel integriert
- 3 Arten von CMOS-Sensoren
  - Passiv-Pixel-Sensoren (PPS)
  - Aktiv-Pixel-Sensoren (APS)
    - APS mit Photodiode
    - APS mit MOS-Kondensator (Photgate)
  - Digital-Pixel-Sensoren (DPS)

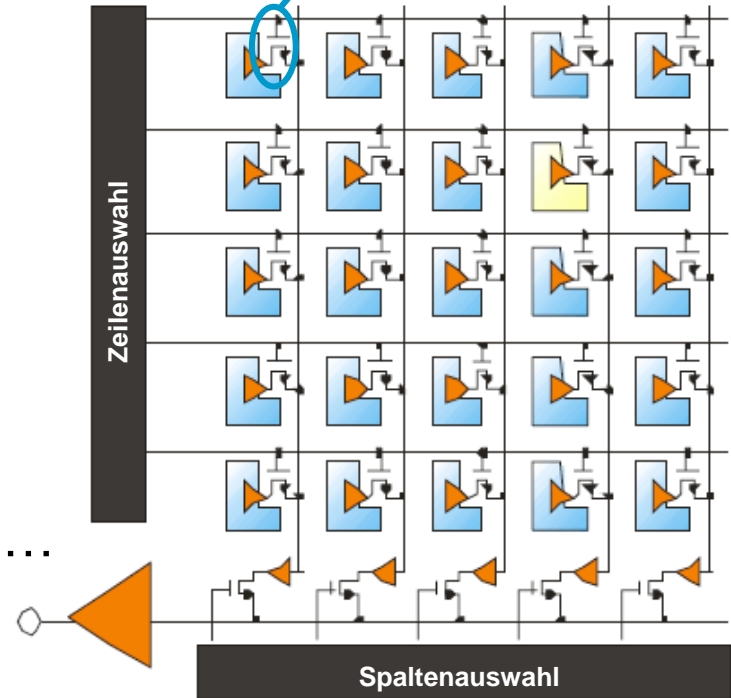
# Random Access Pixel



... CCD-Sensoren

vs. CMOS-Sensoren ...

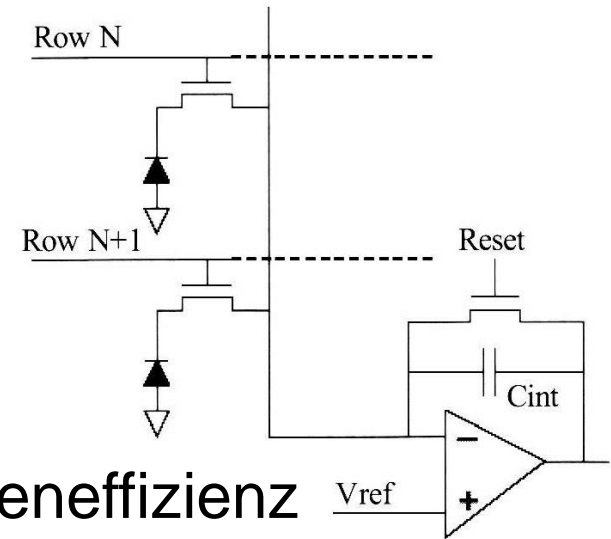
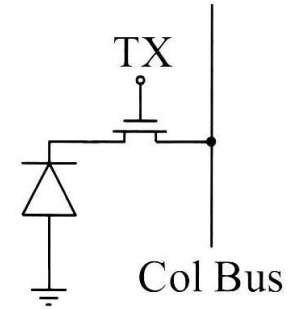
Ladungs-Spannungs-  
Umsetzung in jedem Pixel



... ADU am gleichen Chip  
(CMOS-Prozess)

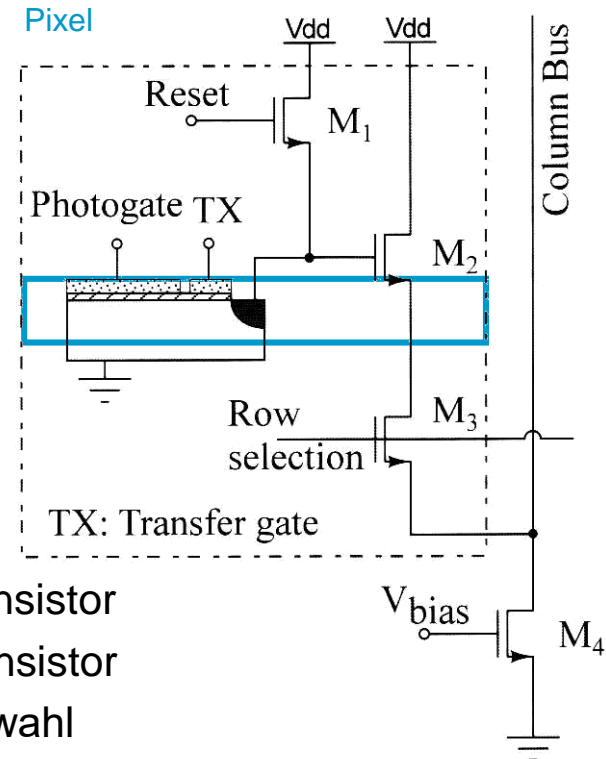
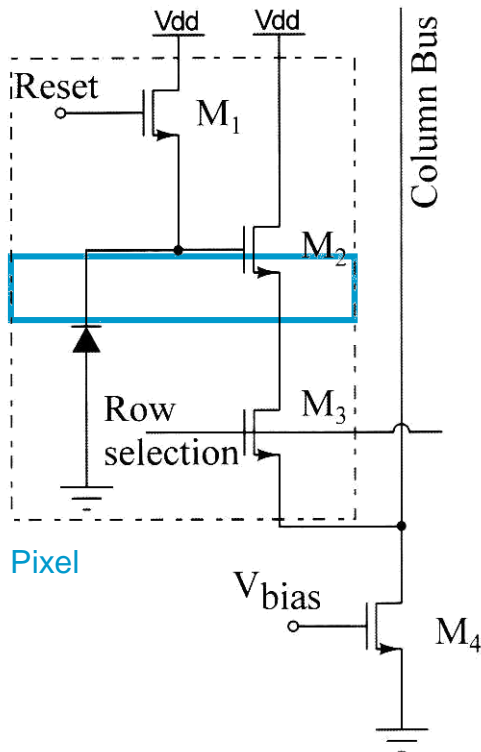
# CMOS Passiv-Pixel-Sensor (PPS)

- Erfunden 1967 (vor CCD-Sensoren)
- Nur 1 Auswahl-Transistor integriert in Pixel
  - = Photodioden-Array
  - Photodiode + Transistor
- Moderne PPS-Sensoren:
  - Ein Ladungsintegrator-Verstärker (CIA) je Spalte
  - Pixel-Reset:
    - $U_{ref}$  am CIA, Reset-Schalter geschlossen
    - Photodiode mit  $U_{ref}$  in Sperrrichtung
  - TX geschlossen (Licht-Integration)
    - Kapazität der Diode entladen  $\sim$  Intensität  $I$
  - TX geöffnet: Pixel-Auslesen
    - Ladung über Busleitung und CIA
    - $\rightarrow U_{ref} - U_A \sim$  Bestrahlung ( $\int I dt$ )
- Vorteile: Bester Füllfaktor, hohe Quanteneffizienz
- Nachteile: Langsames Auslesen (RC), Rauschen!
- Fixed pattern noise FPN (jede PD hat unterschiedl  $I_{dark}$ )



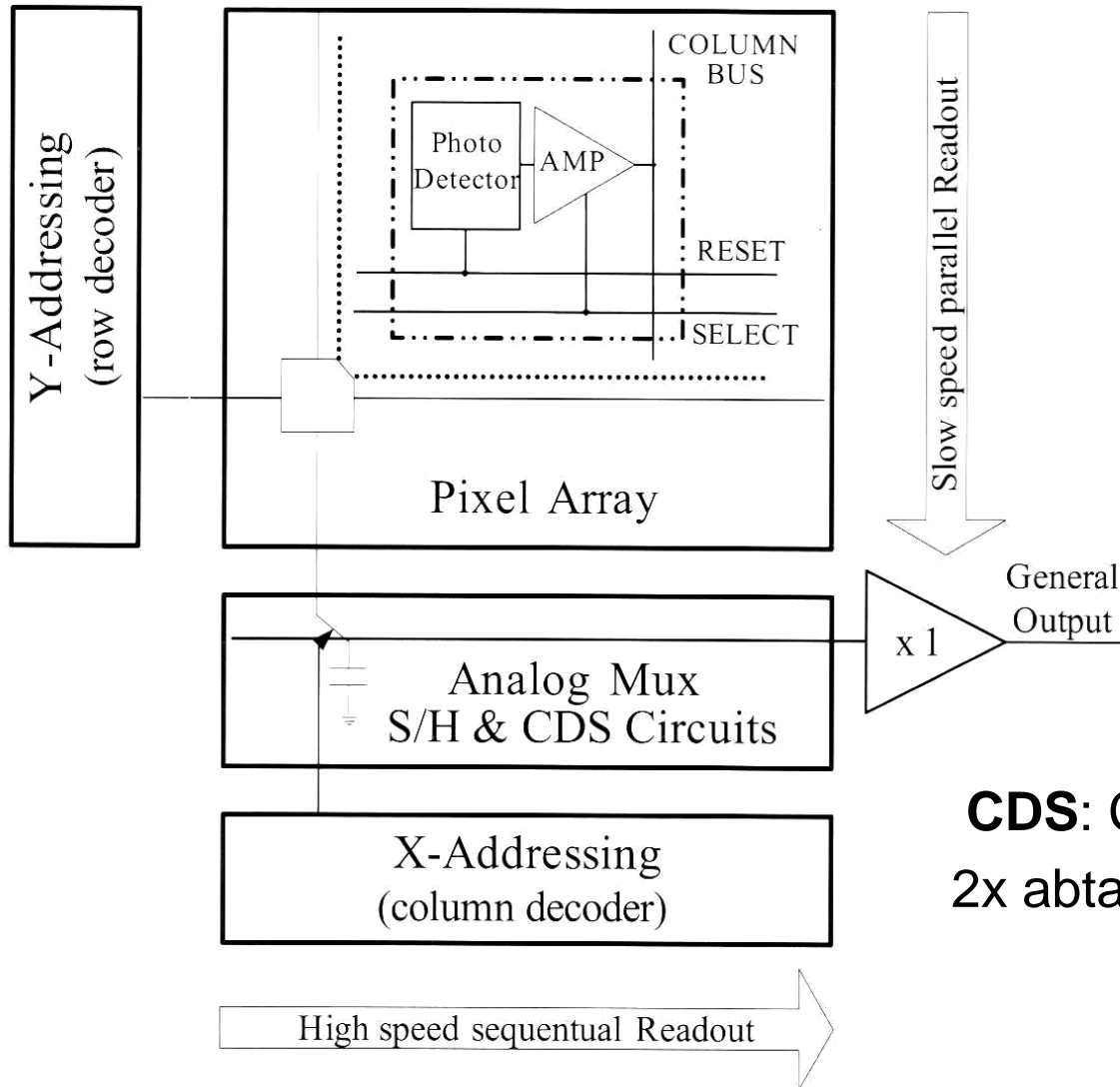
# CMOS Active Pixel Sensor (APS)

- Erfunden 1968 (APS mit Photodiode)
- Photodiode oder Photogate (~sample&hold)
- Ausleseeinheit (Auswahl-, Reset- und Verstärker-Transistor) je Pixel
- Pixel nach dem Prinzip der Ladungsintegration



M1 ... Reset-Transistor  
M2 ... Buffer-Transistor  
M3 ... Zeilenauswahl

# Auslesen einer APS-Struktur



**CDS:** Correlated Double Sampling  
 2x abtasten → Rauschverminderung

# Alternative APS-Strukturen

- Logarithmische Pixel-Charakteristik

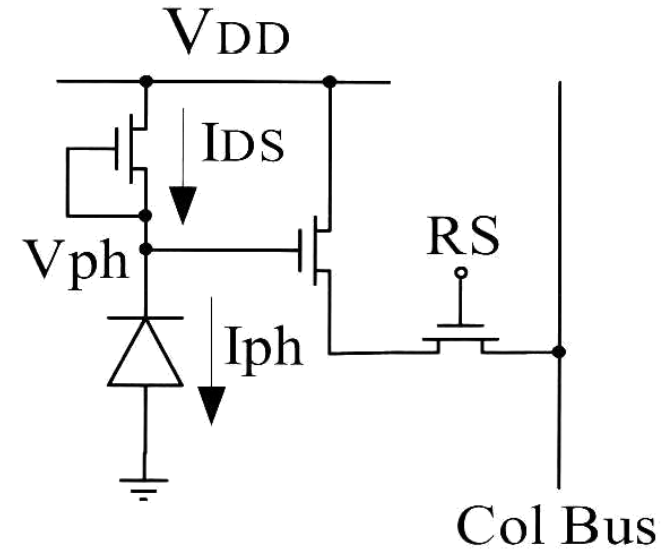
$$U_{PH} = U_{DD} - \Delta U_{PH} = U_{DD} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{PH}}{I_0}$$

Vorteil 1:  $U_{out} \sim \ln(E_e)$ : Dynamischer Bereich erreichbar 120dB

Vorteil 2: kontinuierlicher Sensor  $U \sim E_e \rightarrow$  schnelles Auslesen

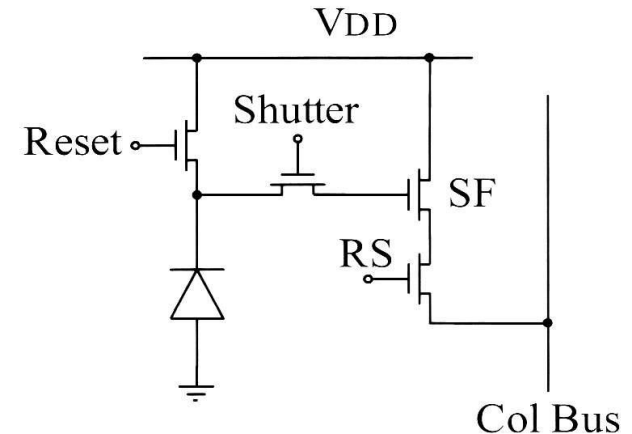
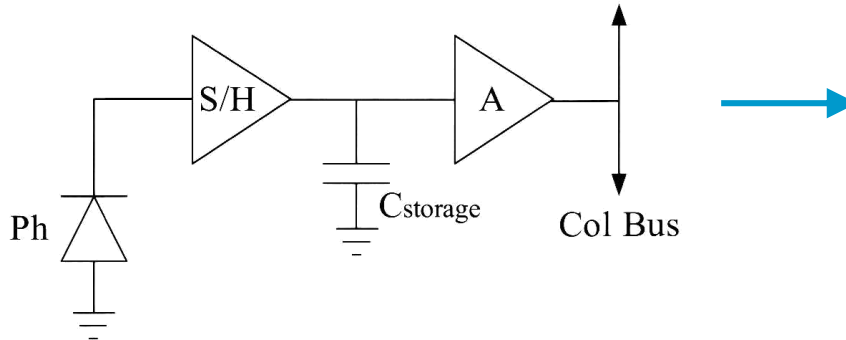
Nachteile:

Hohes Rauschen  $\rightarrow$  reduziertes SNR  $\sim 55$ dB;  
langsam bei schwankender Intensität (bei dunklen Szenen)



# Alternative APS-Strukturen (II)

- Snapshot-Pixel → Global Shutter



- Ein Speicherelement (Sample&Hold) in jedem Pixel
  - Simultane Integration aller Pixel
  - Shutter stoppt Integration für alle Pixel
  - Auslesen aller Pixel, dann
  - Start der nächsten Bildaufnahme

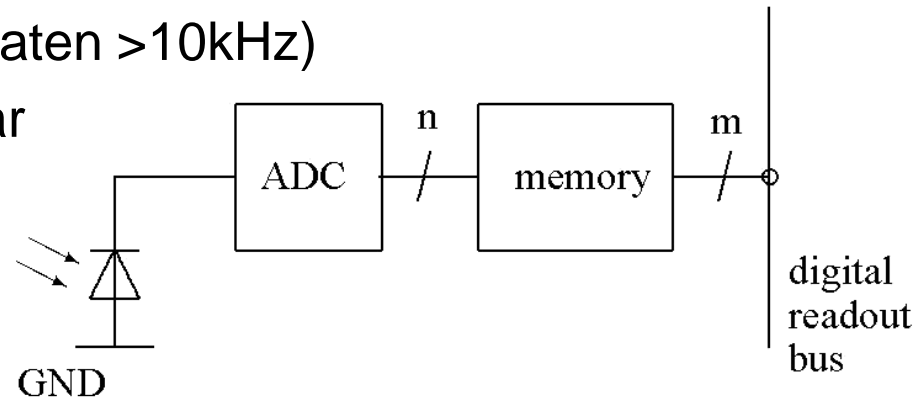
Nachteil: Verlust an aktiver Pixelfläche, Shutter-Effizienz

Vorteil: Global Shutter → für schnell bewegte Objekte



# Digital Pixel Sensor (DPS)

- Photodiode + Reset + Verstärker + ADC je Pixel
- Vorteile
  - Parallele Operation aller ADCs
  - Schnelles Auslesen (Frameraten  $>10\text{kHz}$ )
  - Langsame ADCs verwendbar
  - Exzellentes SNR ( $>80\text{dB}$ )

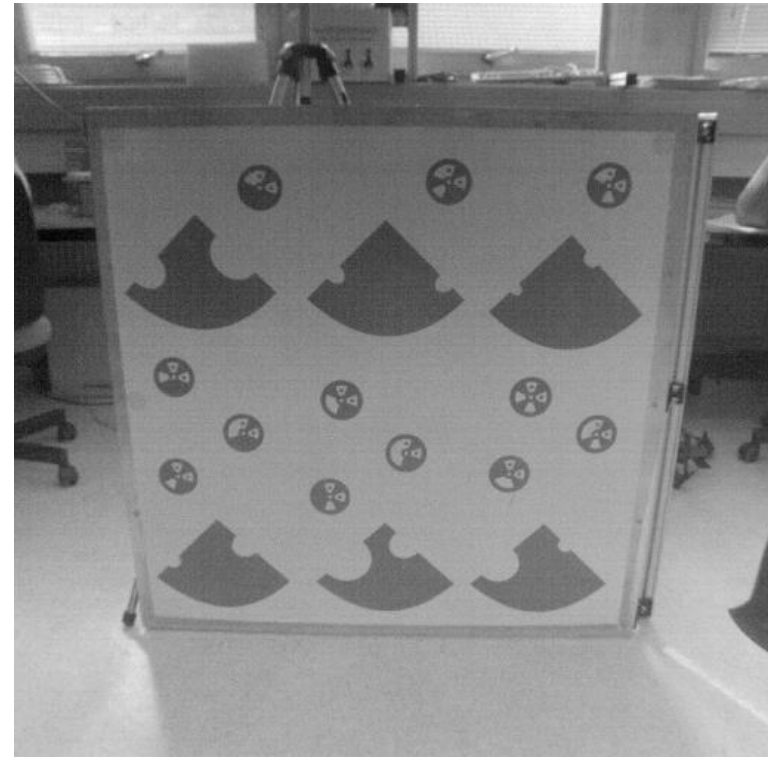
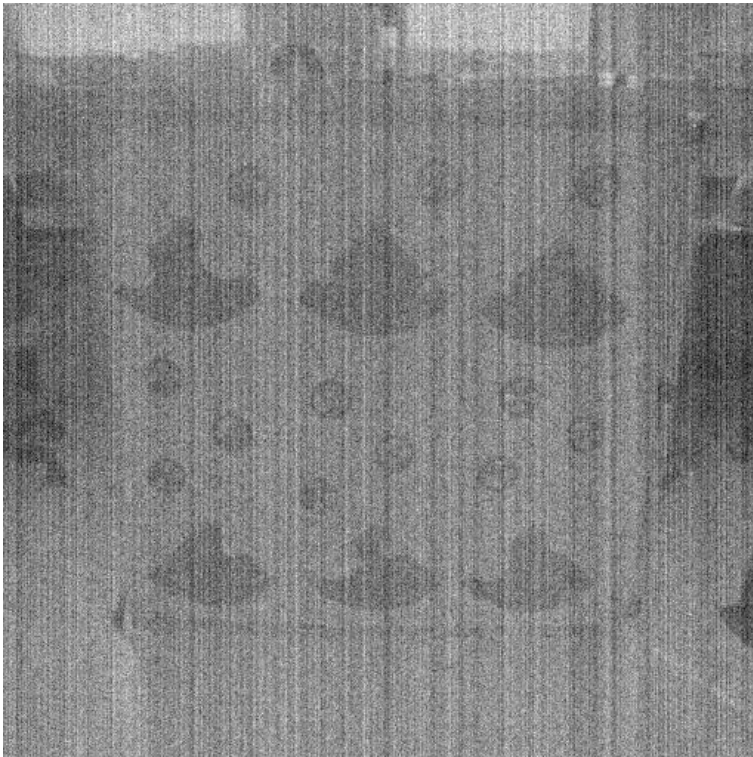


- Nachteile
  - Teuer (mehr Chipfläche)
  - Stark reduzierter Füllfaktor und Dynamik
  - Leistungsverbrauch

# Fixed Pattern Noise (FPN)

- Streuung der Pixel-Eigenschaften
- Temperatur-Abhängigkeit!
- Kalibration notwendig

FUGA1000, 1MPixel

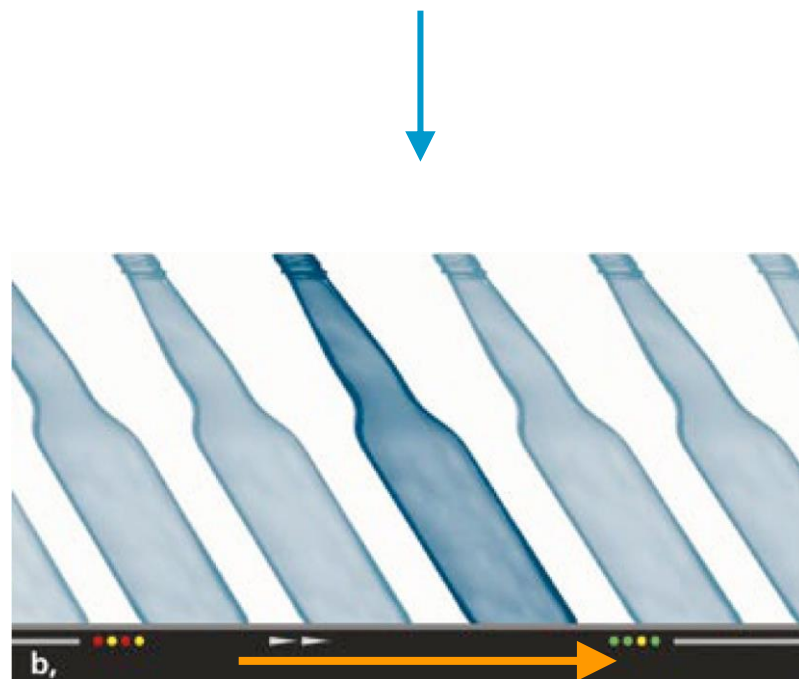
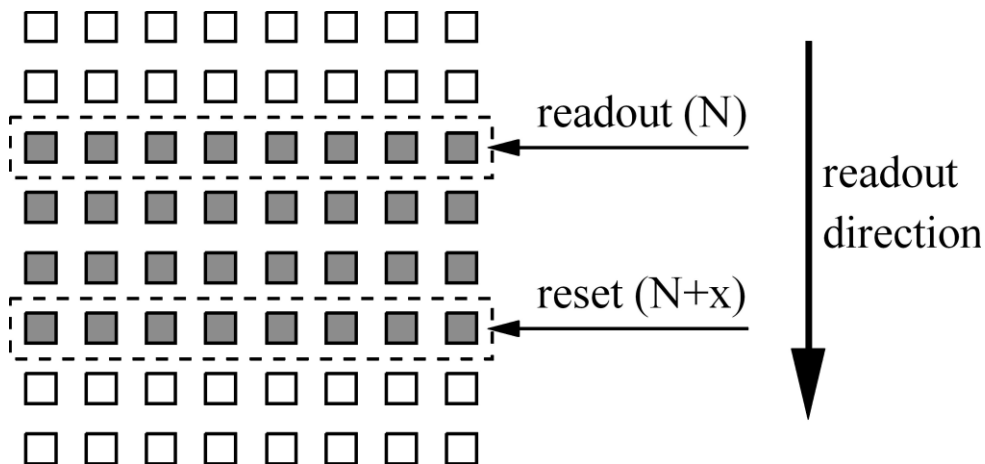


# Elektronischer Verschluss - Shutter

## Synchroner (global) Shutter

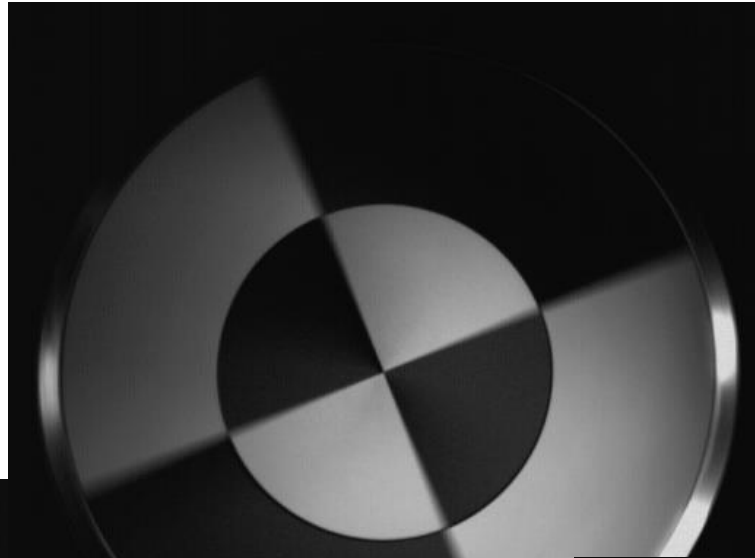


## Rolling Shutter



# Shutter (II)

Synchroner Shutter ( $t_1$ )



Rolling Shutter

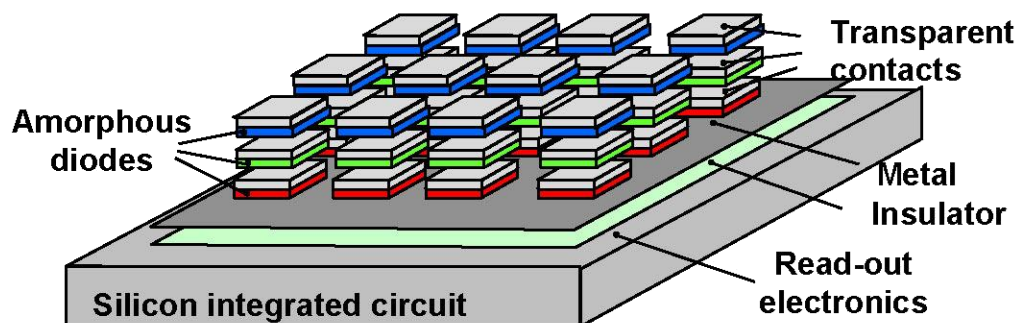
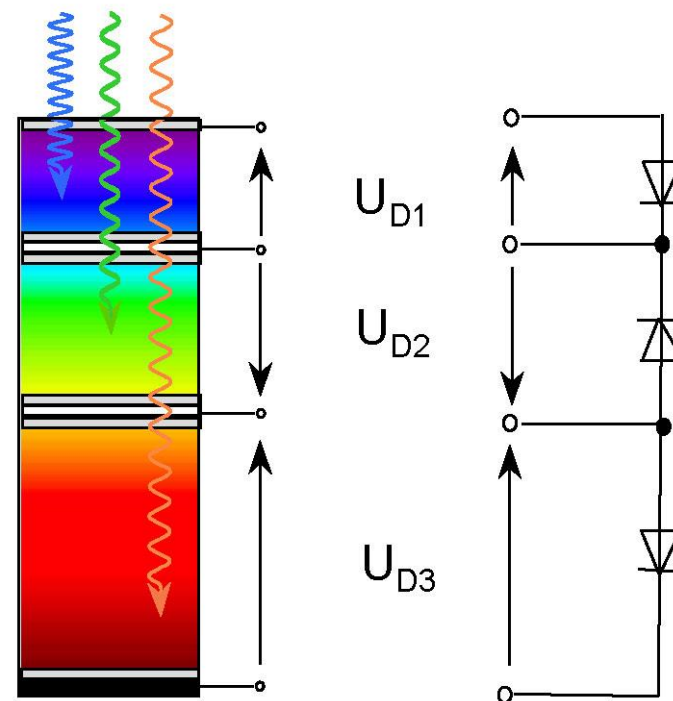
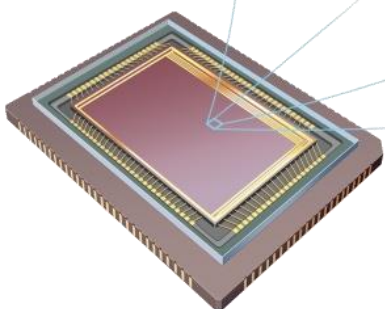
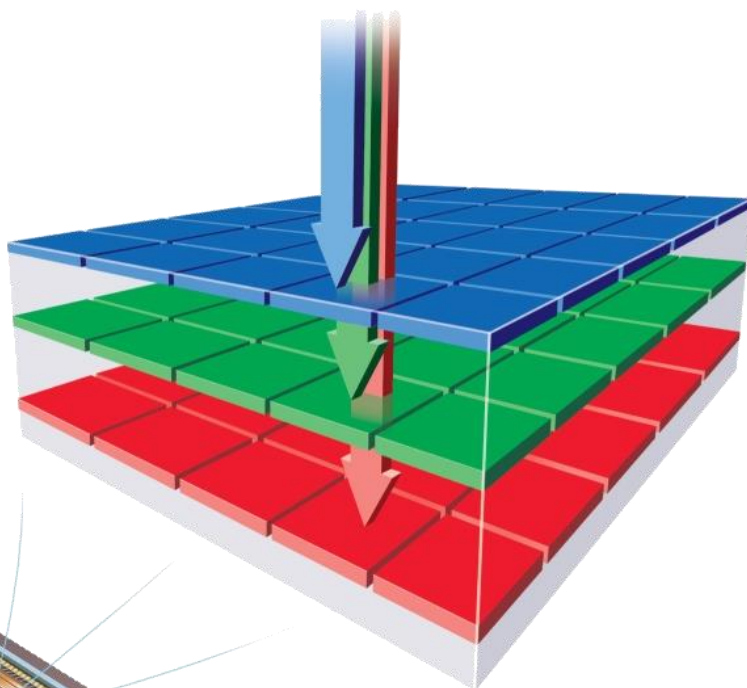


Synchroner Shutter ( $t_2 > t_1$ )



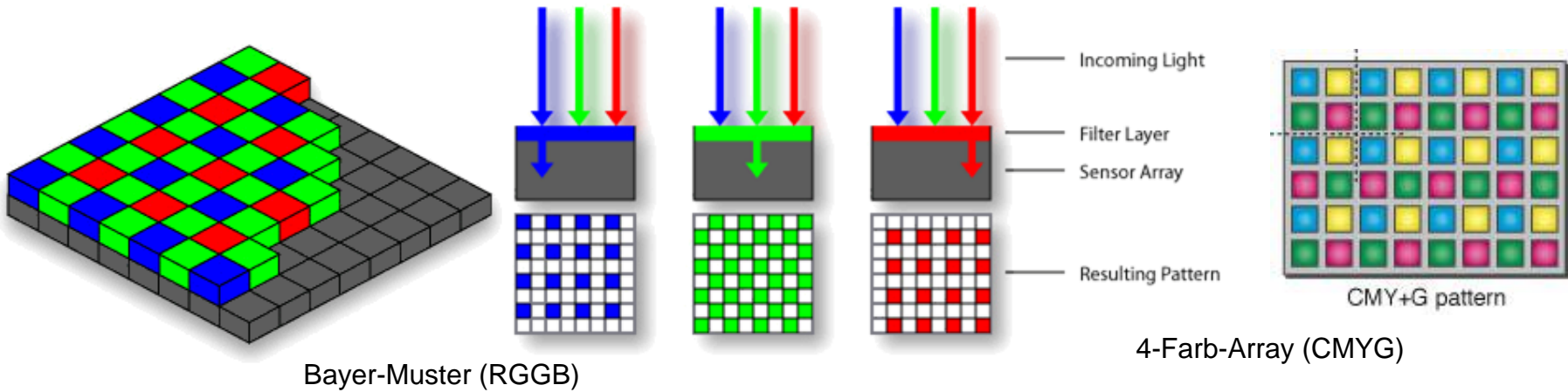
# CMOS Farbsensor

## Foveon-Sensor

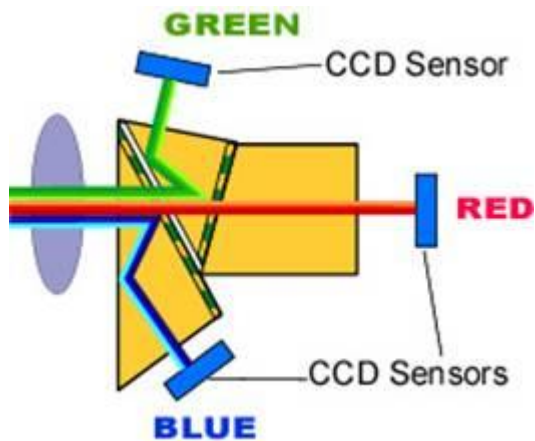


# CMOS-Farbsensoren: Auch alle anderen Möglichkeiten so wie für CCD-Sensoren

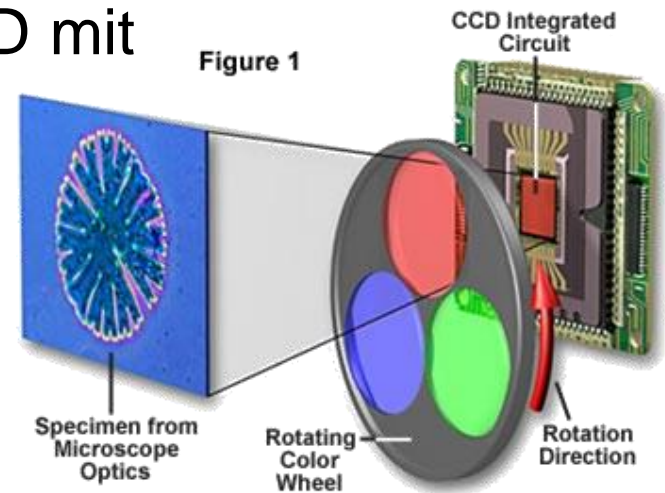
- Farbfiler-Muster vor Pixel-Array



- 3-CCD-Chip:



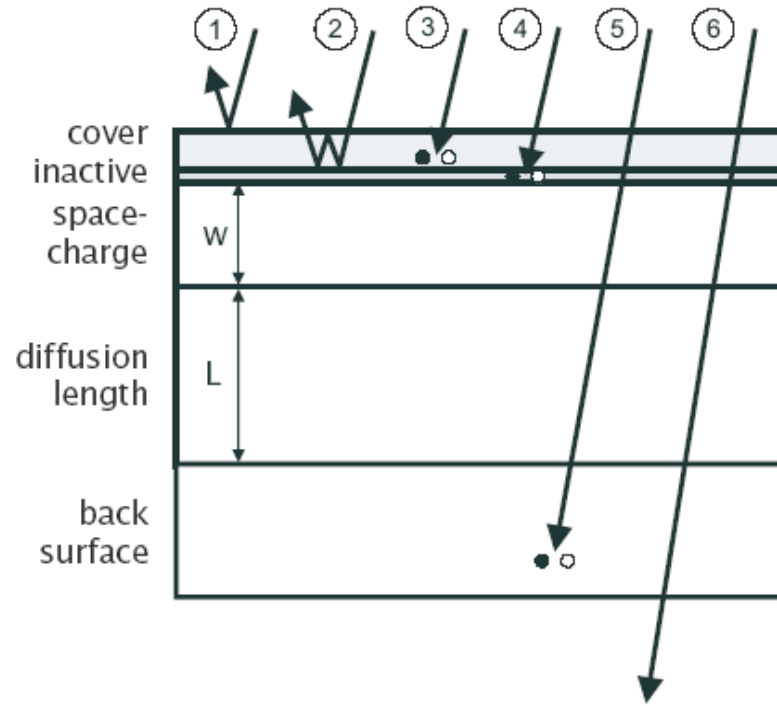
- Single-CCD mit Filter-Rad:



# CMOS im Vergleich zu CCD

- Fertigung als CMOS-Prozess
  - „Single-Die“-Lösung
  - kostengünstiger
- SNR und Dynamik vergleichbar (bis 50-70dB)
- Sensitivität (z.B. logarithmische Charakteristik möglich)
- Füllfaktor (→ Mikrolinsen-Arrays)
- Kein Ladungstransfer nötig (Informationsverlust)
- Wahlfreier Zugriff → Auslesen von Teilbereichen
- Geschwindigkeit (kontinuierliche Sensoren, ROIs)
- Geringerer Stromverbrauch
- Fertigung großer Arrays (→ Transfereffizienz)

# Optical Losses

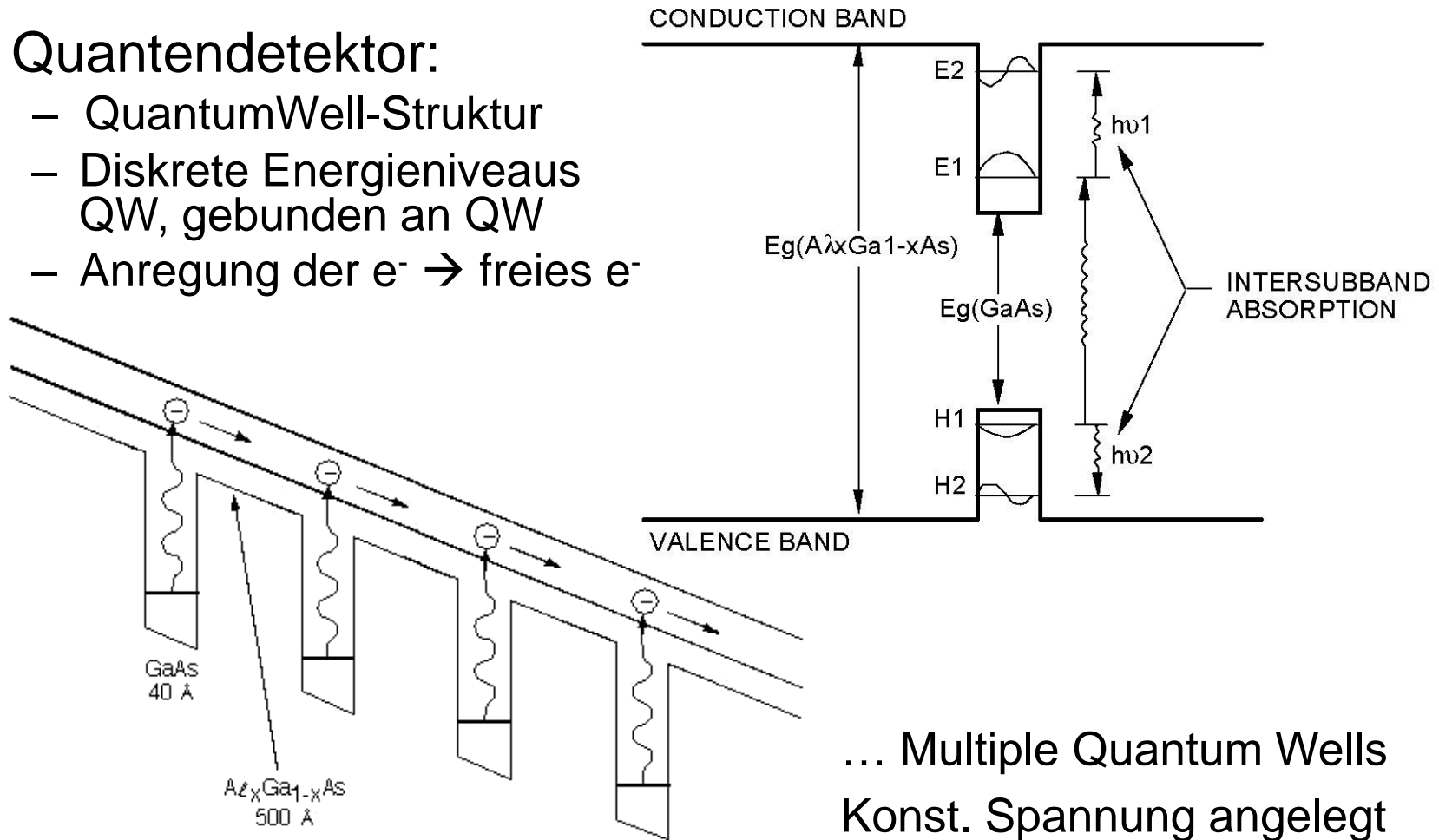


**Figure 7.3:** Schematic representation of the optical losses encountered in semiconductor photosensors: (1) surface reflection, (2) thin-film interference, (3) absorption in the cover, (4) photocharge loss in inactive regions, (5) interaction deep in the semiconductor bulk, and (6) transmission through the semiconductor.



# QWIP: Quantum Well Infrared Photodetector

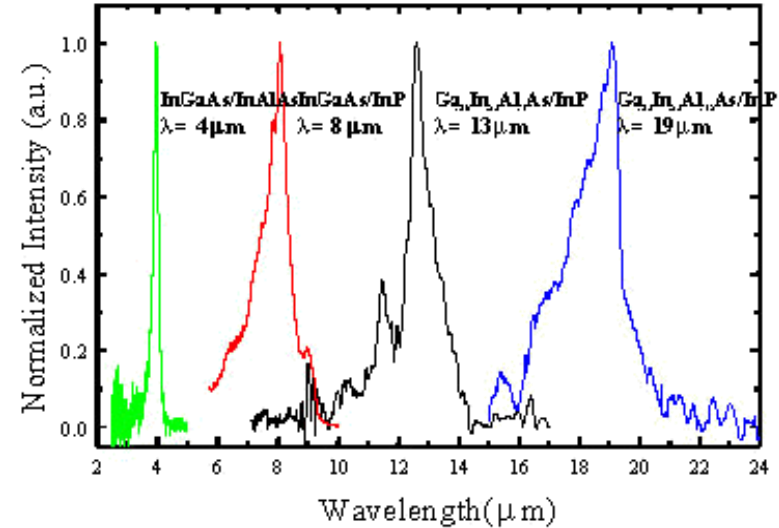
- Quantendetektor:
  - QuantumWell-Struktur
  - Diskrete Energieniveaus QW, gebunden an QW
  - Anregung der  $e^- \rightarrow$  freies  $e^-$



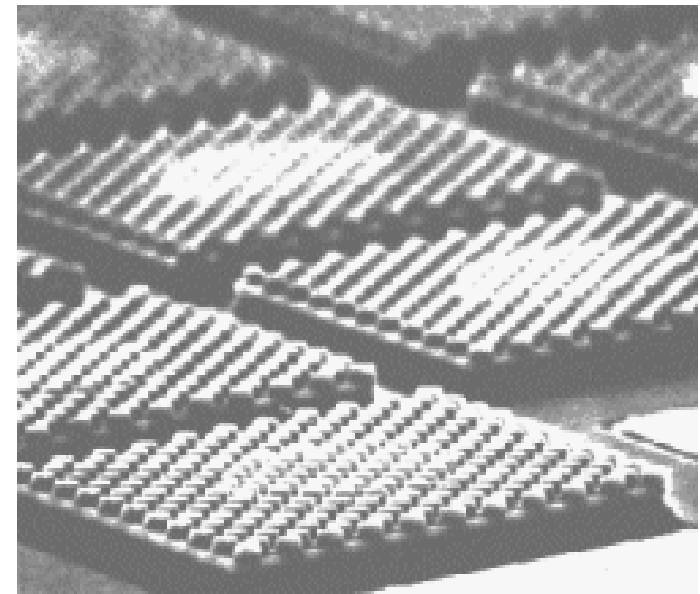
... Multiple Quantum Wells  
Konst. Spannung angelegt

# QWIP (II)

- Empfindlich im Infrarot-Bereich  
→ Thermographie
- Sehr schmalbandig
- Extrem schnell
- Kombination mehrerer QWs
  - Empfindlichkeit
  - Breitbandigkeit
- Array von MQWIPs
  - Frameraten bis 10kHz!
  - High-End-Thermokameras
  - spektral empfindlich → Optische Multispektralanalyse



InP-related quantum well infrared photodetectors cover the range  $3 > \lambda > 20 \mu\text{m}$ .



# Thermische Detektoren

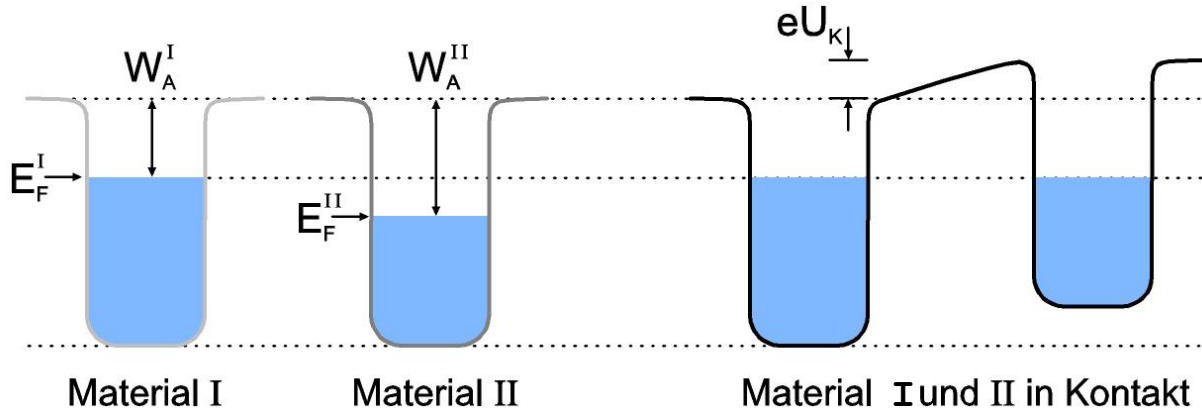
- Primäre Antwort des Detektors auf einfallende Strahlung ist Temperaturanstieg
- Thermische Detektoren
  - Thermoelemente (Thermosäulen)
    - **Thermospannung** (Kontaktspannung  $\sim T$ )
  - Bolometer (Metall) und Thermistoren (Halbleiter)
    - **Widerstand** ändert sich durch Temperaturänderung
  - Pyroelektrische Detektoren
    - **Ladung** ändert sich durch Temperaturänderung
- Absorber (geschwärzte Platte, spezielle Halbleiterplatte)
  - notwendig zur Photonen-Wärme-Umsetzung

$$W_{\text{Ph}} = hf \quad \text{Änderung der Wärmemenge: } \Delta Q_W = mc_W \Delta T$$

$$E_e = \frac{P_{\text{opt}}}{A_{\text{Det}}} \rightarrow W_{\text{absorb}} = \alpha E_e A_{\text{Det}} t_{\text{int}} = mc_W \Delta T$$

# Thermoelemente

- Der Seebeck-Effekt:  $eU_{th} = W_{A_1} - W_{A_2}$



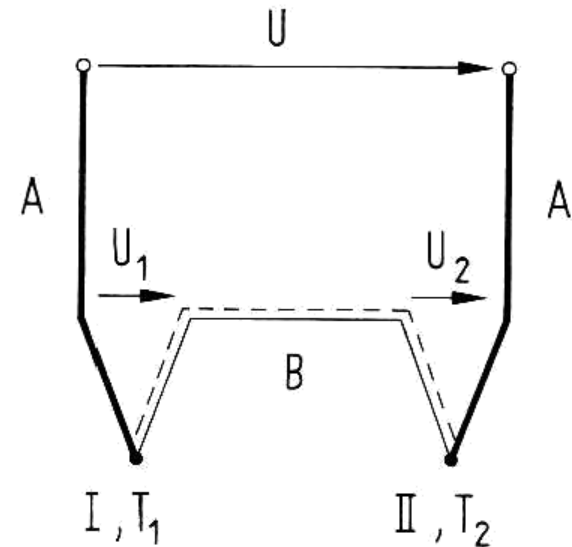
Thermospannung  $U_{th} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = k_{AB}T$

Bsp.:  $k_{FeKo} \sim 53.7 \mu V/^\circ C$ ;  $k_{NiCr-Ni} \sim 41 \mu V/^\circ C$

- Thermoelement

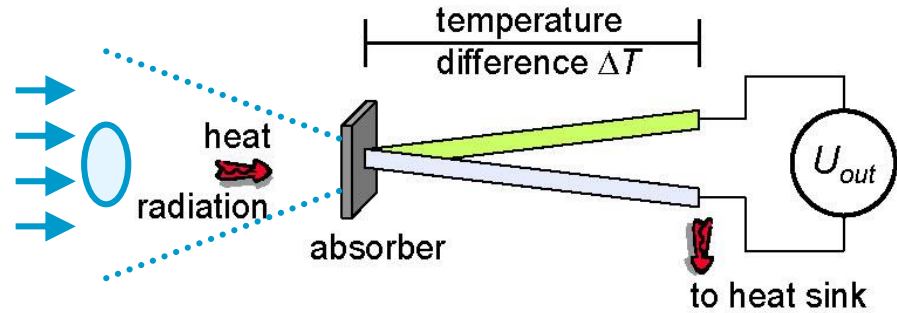
$$U = U_1 + U_2 = k_{AB}(T_1 - T_2)$$

... Messung von Temperaturdifferenzen

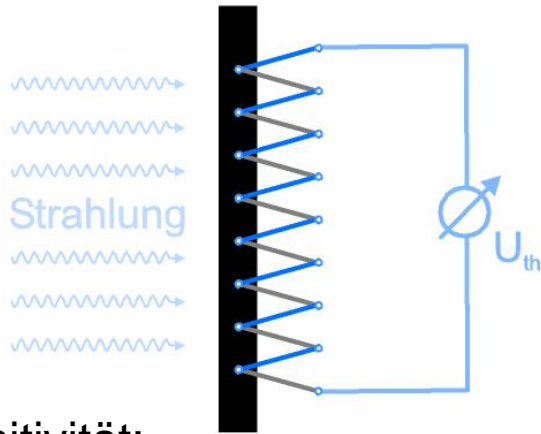


# Die Thermosäule (Thermopile)

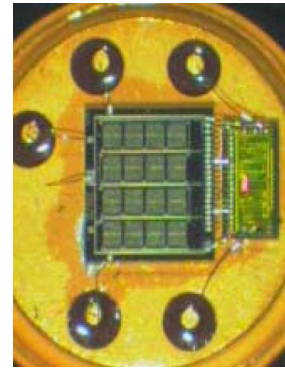
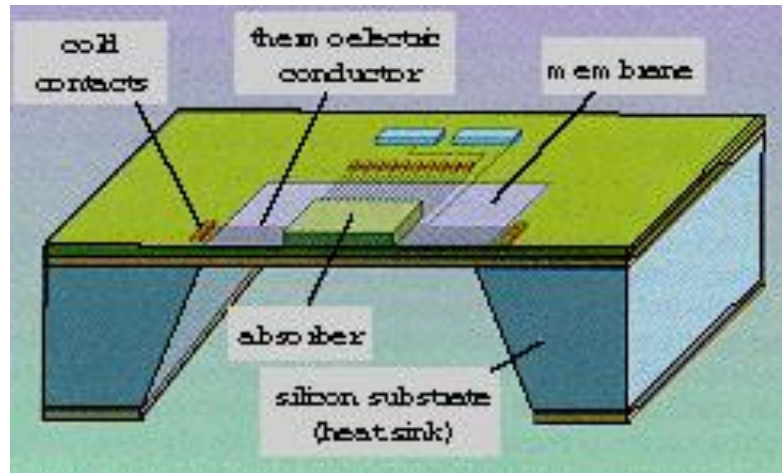
- Strahlungsmessung mit Thermoelementen
- Steigerung der Empfindlichkeit: Die Thermosäule



Absorber



## Miniaturisierung:



$t_r \sim 10\text{ms}$ , Genauigkeit  $\sim 1^\circ\text{C}$

Sensitivität:

$$S_P = U_{\text{Out}} / P_{\text{opt}} \sim 10\text{-}100\text{V/W}$$

$$S_T = U_{\text{Out}} / \Delta T \sim 10\text{mV}/^\circ\text{C}$$

# Bolometer und Mikrobolometer

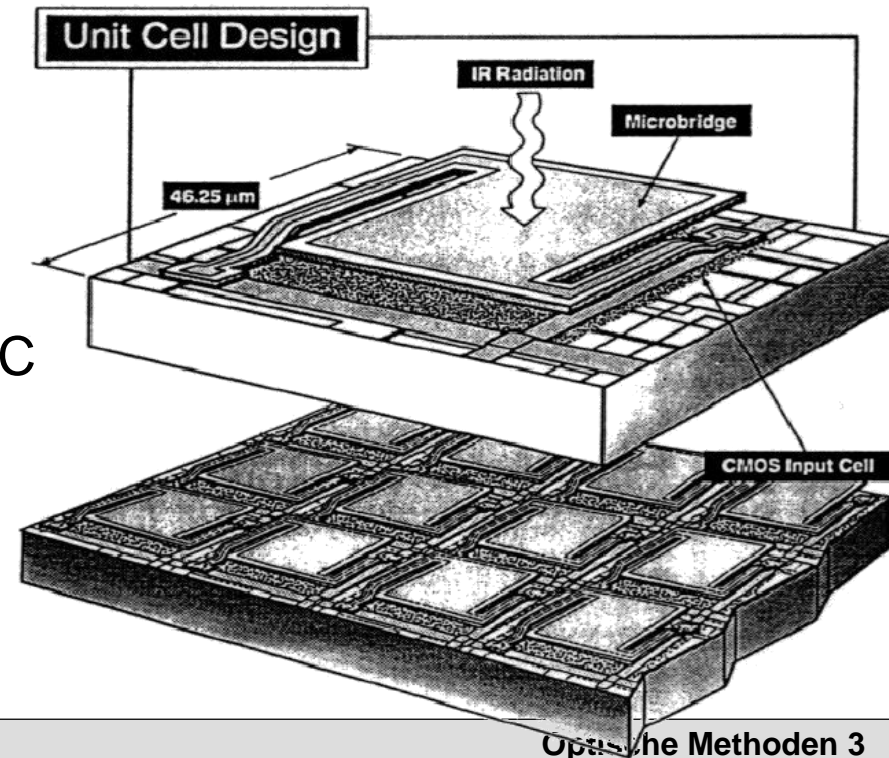
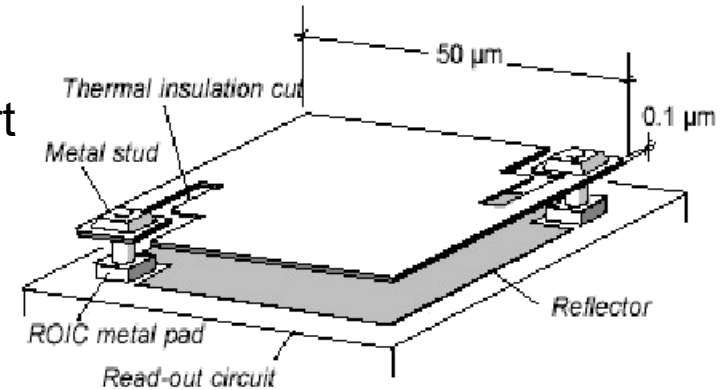
- Bolometer:

- Metallische Platte/Draht, Widerstand („Reibung“ der Leitungselektronen) ändert sich mit Temperatur
- Optische Strahlung bewirkt Erwärmung des Bolometers
- Einsatzgebiet: Erfassung von Infrarot-Strahlung, Thermographie;
- langsamer Detektor ( $t_r > 50\text{ms}$ )
- Sensitivität:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta T}$$

- Mikrobolometer:

- Vanadiumoxid  $\text{VO}_x$ :  $S \sim 0.02/^\circ\text{C}$
- 2D-Array aus Sensoren
- relativ schnell,  $t_r \sim 5\text{ms}$
- Wärmebildkameras mit Videorate (bis 60Hz)



# Thermistoren

- Thermische Detektoren aus Halbleitermaterial
  - Strahlung bewirkt Erwärmung (Absorber nötig)
  - Zahl der freien Ladungsträger steigt mit Temperatur
  - Widerstand  $R$  sinkt mit Temperatur (Heißleiter NTC)

$$R(T) = R(T_0)e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

$b$ ... Materialkonstante in K

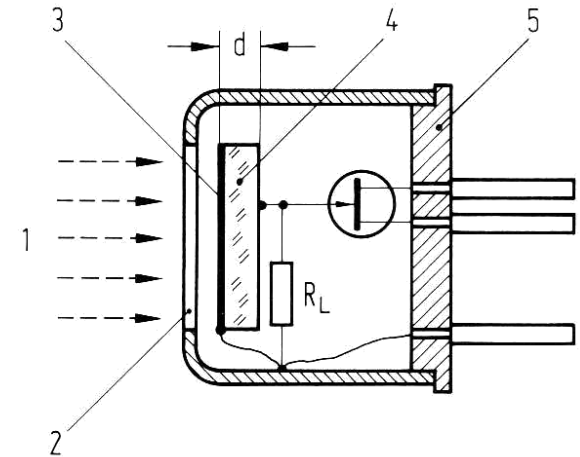
- Empfindlichkeit

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta T}, \text{ typ. } \sim 0.04/\text{C}$$

## Pyroelektrische Detektoren

- Piezoelektrische thermische Detektoren

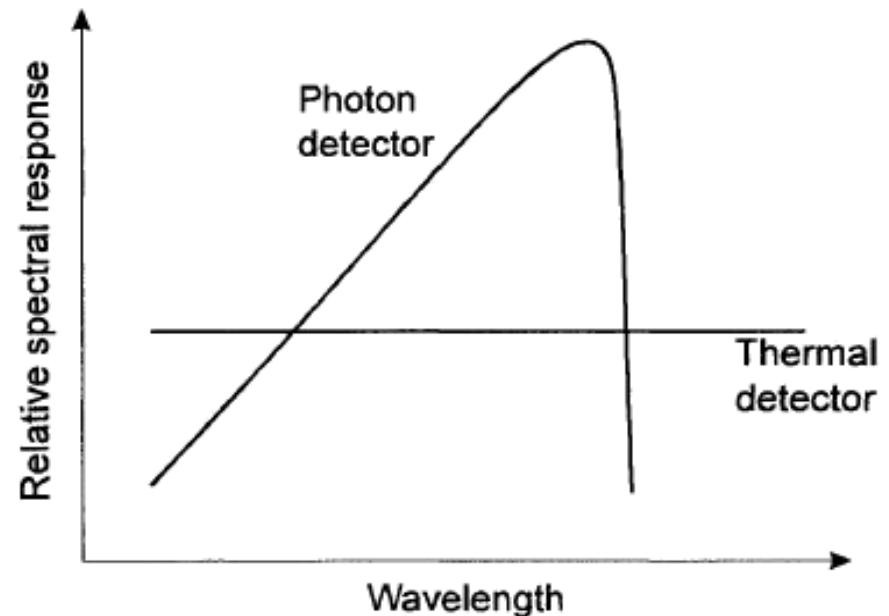
- Strahlung bewirkt Erwärmung (Absorber nötig)
- Ladungsschwerpunkte im Kristall verschieben sich
- An Elektroden erscheint Ladung  $\Delta Q = k_Q A \Delta T$ ,  $\Delta U = k_U d \Delta T$



1 Infrarotstrahlung, 2 infrarotdurchlässiges Fenster, 3 Absorber, 4 pyroelektrisches Material, 5 Transistorgehäuse

# Eigenschaften der thermischen Detektoren

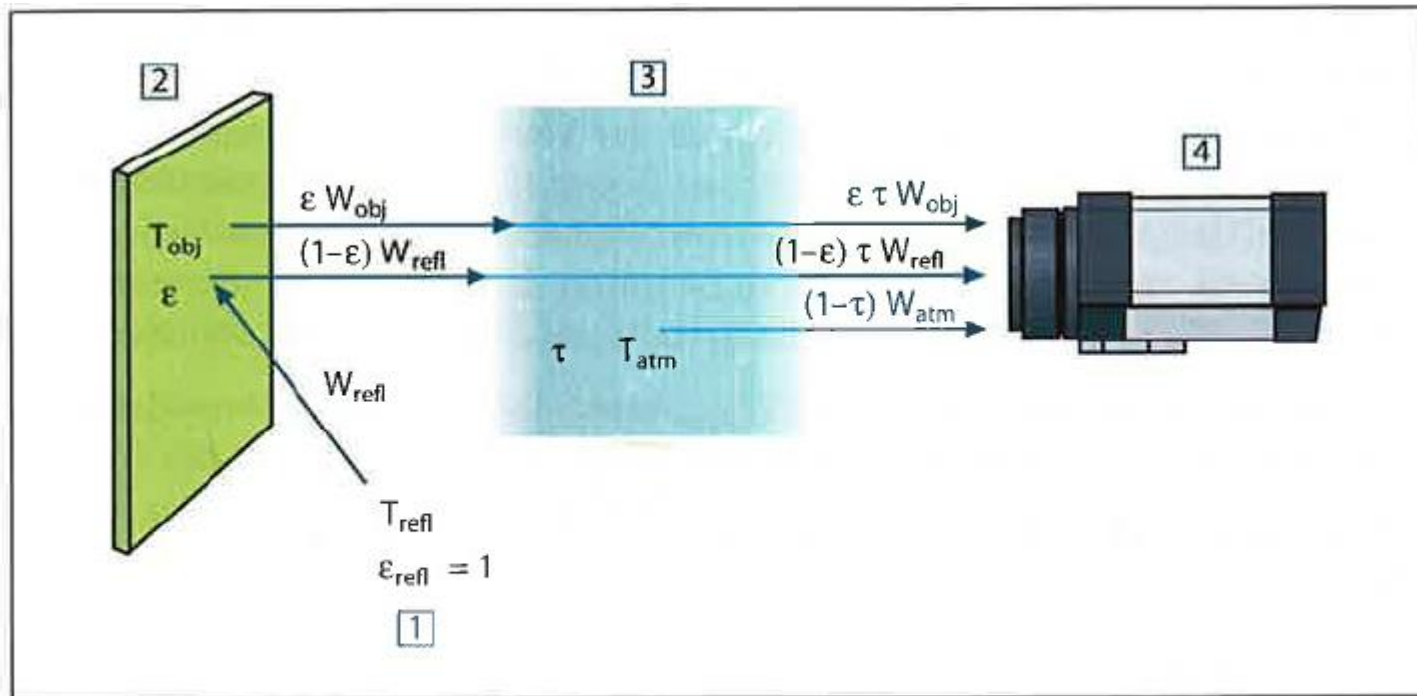
- Haupteinsatzgebiet: Messung von thermischer Strahlung (IR-Strahlung)
  - Strahlungsthermometer (Pyrometer)
  - Thermografie
- Breitbandige Empfindlichkeit
- Eher langsam ( $t_r \sim \text{ms}$ )
- kostengünstig
- Örtlich auflösende IR-Sensoren
  - Mikrobolometer günstig
  - Kühlung nicht notwendig





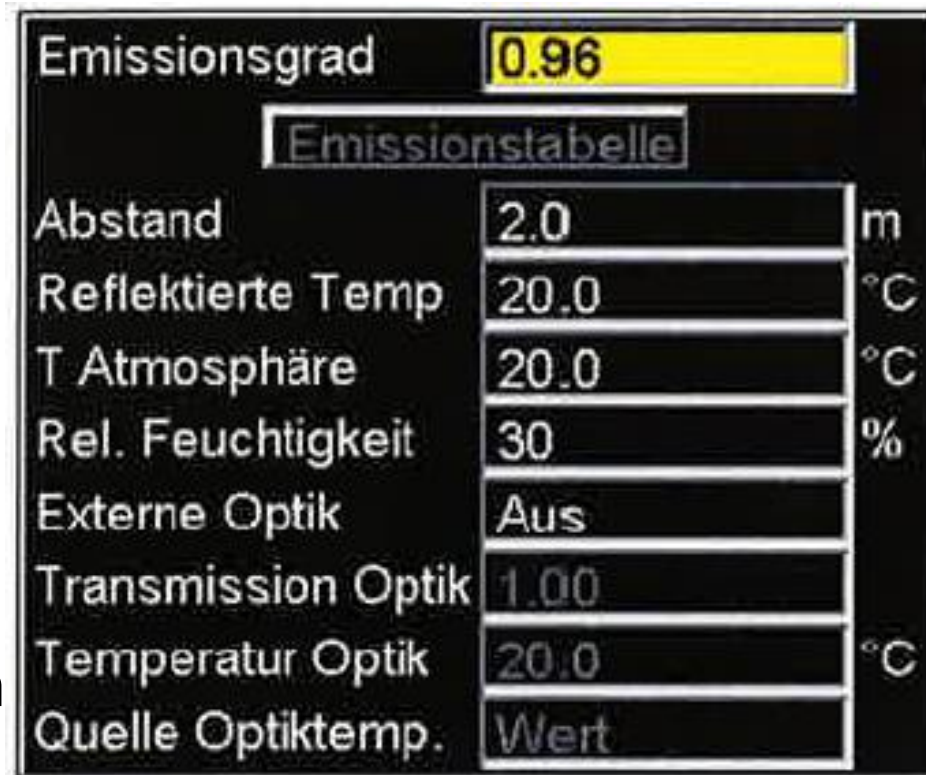
# Demo: FLIR ThermoVision A20 M (1)

- 160 x 120 pixel Mikrobolometer-Array
- Spectral range: 7.5 – 13  $\mu\text{m}$  (LW)
- Praktische Aspekte im messtechn. Gebrauch



# FLIR ThermoVision A20 M (2)

- Praktische Aspekte im messtechn. Gebrauch

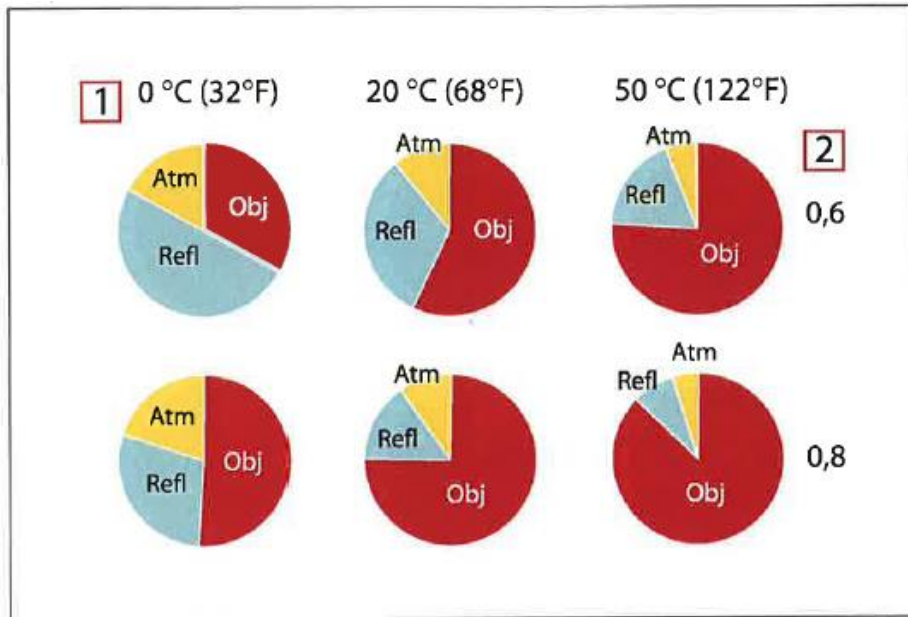


- Emission

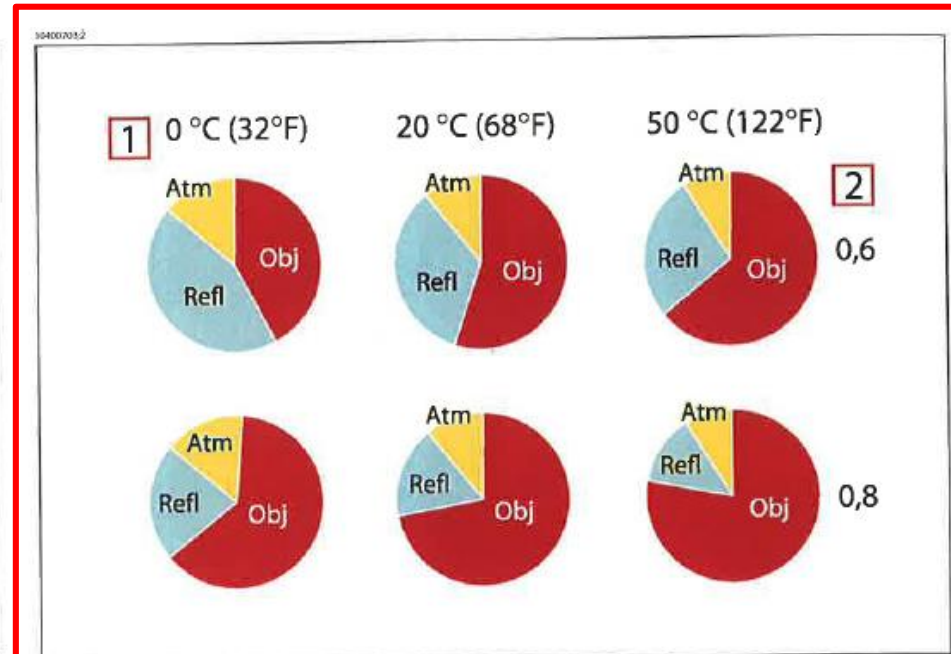
Abbildung 17.23 Das Dialogfeld Objektparameter

# FLIR ThermoVision A20 M (3)

- Praktische Aspekte im messtechn. Gebrauch
- Spectral range: 7.5 – 13  $\mu\text{m}$  (LW)



**Abbildung 26.3** Relative Größen der Strahlungsquellen unter verschiedenen Messbedingungen (SW-Kamera). 1: Objekttemperatur; 2: Abstrahlung; Obj: Objektstrahlung; Refl: Reflektierte Strahlung; Atm: Atmosphärenstrahlung. Feste Parameter:  $\tau = 0,88$ ;  $T_{\text{refl}} = 20 \text{ °C (+68 °F)}$ ;  $T_{\text{atm}} = 20 \text{ °C (+68 °F)}$ .



**Abbildung 26.4** Relative Größen der Strahlungsquellen unter verschiedenen Messbedingungen (LW-Kamera). 1: Objekttemperatur; 2: Abstrahlung; Obj: Objektstrahlung; Refl: Reflektierte Strahlung; Atm: Atmosphärenstrahlung. Feste Parameter:  $\tau = 0,88$ ;  $T_{\text{refl}} = 20 \text{ °C (+68 °F)}$ ;  $T_{\text{atm}} = 20 \text{ °C (+68 °F)}$ .

# 27 Emissionstabellen

In diesem Abschnitt finden Sie eine Aufstellung von Emissionsdaten aus der Fachliteratur und eigenen Messungen von FLIR Systems.

## 27.1 Referenzen

1	Mikaél A. Bramson: <i>Infrared Radiation, A Handbook for Applications</i> , Plenum press, N.Y.
2	William L. Wolfe, George J. Zissis: <i>The Infrared Handbook</i> , Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
3	Madding, R.P.: <i>Thermographic Instruments and Systems</i> . Madison, Wisconsin: University of Wisconsin - Extension, Department of Engineering and Applied Science.
4	William L. Wolfe: <i>Handbook of Military Infrared Technology</i> , Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
5	Jones, Smith, Probert: <i>External thermography of buildings...</i> , Proc. of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, vol.110, Industrial and Civil Applications of Infrared Technology, Juni 1977 London.
6	Paijak, Pettersson: <i>Thermography of Buildings</i> , Swedish Building Research Institute, Stockholm 1972.
7	Vlcek, J.: <i>Determination of emissivity with imaging radiometers and some emissivities at <math>\lambda = 5 \mu\text{m}</math></i> . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
8	Kern: <i>Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites</i> , Defence Documentation Center, AD 617 417.
9	Öhman, Claes: <i>Emissionmätningar med AGEMA E-Box</i> . Teknisk rapport, AGEMA 1999. (Emissionsmessungen mit AGEMA E-Box. Technischer Bericht, AGEMA 1999.)

Thermographie **benötigt**  
Expertenwissen

Anzeige/Ergebnisse immer  
kritisch hinterfragen!

## 27.2 Tabellen

**Abbildung 27.1** T: Gesamtspektrum; SW: 2 - 5  $\mu\text{m}$ ; LW: 8 - 14  $\mu\text{m}$ ; LLW: 6,5 - 20  $\mu\text{m}$ ; 1: Werkstoff; 2: Spezifikation; 3: Temperatur in °C; 4: Spektrum; 5: Emissionsgrad; 6: Referenz

1	2	3	4	5	6
Aluminium	Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70	LW	0,03-0,06	9
Aluminium	Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70	SW	0,05-0,08	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	LW	0,97	9

!!!

27



1	2	3	4	5	6
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	SW	0,61	9
Aluminium	eloxiert, schwarz, stumpf	70	LW	0,95	9
Aluminium	eloxiert, schwarz, stumpf	70	SW	0,67	9
Aluminium	eloxiertes Blech	100	T	0,55	2
Aluminium	Folie	27	3 µm	0,09	3
Aluminium	Folie	27	10 µm	0,04	3
Aluminium	geraut	27	3 µm	0,28	3
Aluminium	geraut	27	10 µm	0,18	3
Aluminium	Guss, sandgestrahit	70	LW	0,46	9
Aluminium	Guss, sandgestrahit	70	SW	0,47	9
Aluminium	in HNO <sub>3</sub> getaucht, Platte	100	T	0,05	4
Aluminium	poliert	50-100	T	0,04-0,06	1
Aluminium	poliert, Blech	100	T	0,05	2
Aluminium	polierte Platte	100	T	0,05	4
Aluminium	raue Oberfläche	20-50	T	0,06-0,07	1
Aluminium	stark oxidiert	50-500	T	0,2-0,3	1
Aluminium	stark verwittert	17	SW	0,83-0,94	5
Aluminium	unverändert, Blech	100	T	0,09	2
Aluminium	unverändert, Platte	100	T	0,09	4
Aluminium	vakuumbeschichtet	20	T	0,04	2
Aluminiumbronze		20	T	0,60	1
Aluminiumhydroxid	Pulver		T	0,28	1

1	2	3	4	5	6
Aluminiumoxid	aktiviert, Pulver		T	0,46	1
Aluminiumoxid	rein, Pulver (Aluminiumoxid)		T	0,16	1
Asbest	Bodenfliesen	35	SW	0,94	7
Asbest	Brett	20	T	0,96	1
Asbest	Gewerbe		T	0,78	1
Asbest	Papier	40-400	T	0,93-0,95	1
Asbest	Pulver		T	0,40-0,60	1
Asbest	Ziegel	20	T	0,96	1
Asphaltstraßenbelag		4	LLW	0,967	8
Beton		20	T	0,92	2
Beton	Gehweg	5	LLW	0,974	8
Beton	rau	17	SW	0,97	5
Beton	trocken	36	SW	0,95	7
Blech	glänzend	20-50	T	0,04-0,06	1
Blech	Weißblech	100	T	0,07	2
Blei	glänzend	250	T	0,08	1
Blei	nicht oxidiert, poliert	100	T	0,05	4
Blei	oxidiert, grau	20	T	0,28	1
Blei	oxidiert, grau	22	T	0,28	4
Blei	oxidiert bei 200 °C	200	T	0,63	1
Blei rot		100	T	0,93	4
Blei rot, Pulver		100	T	0,93	1
Bronze	Phosphorbronze	70	LW	0,06	9
Bronze	Phosphorbronze	70	SW	0,08	9
Bronze	poliert	50	T	0,1	1
Bronze	porös, rau	50-150	T	0,55	1