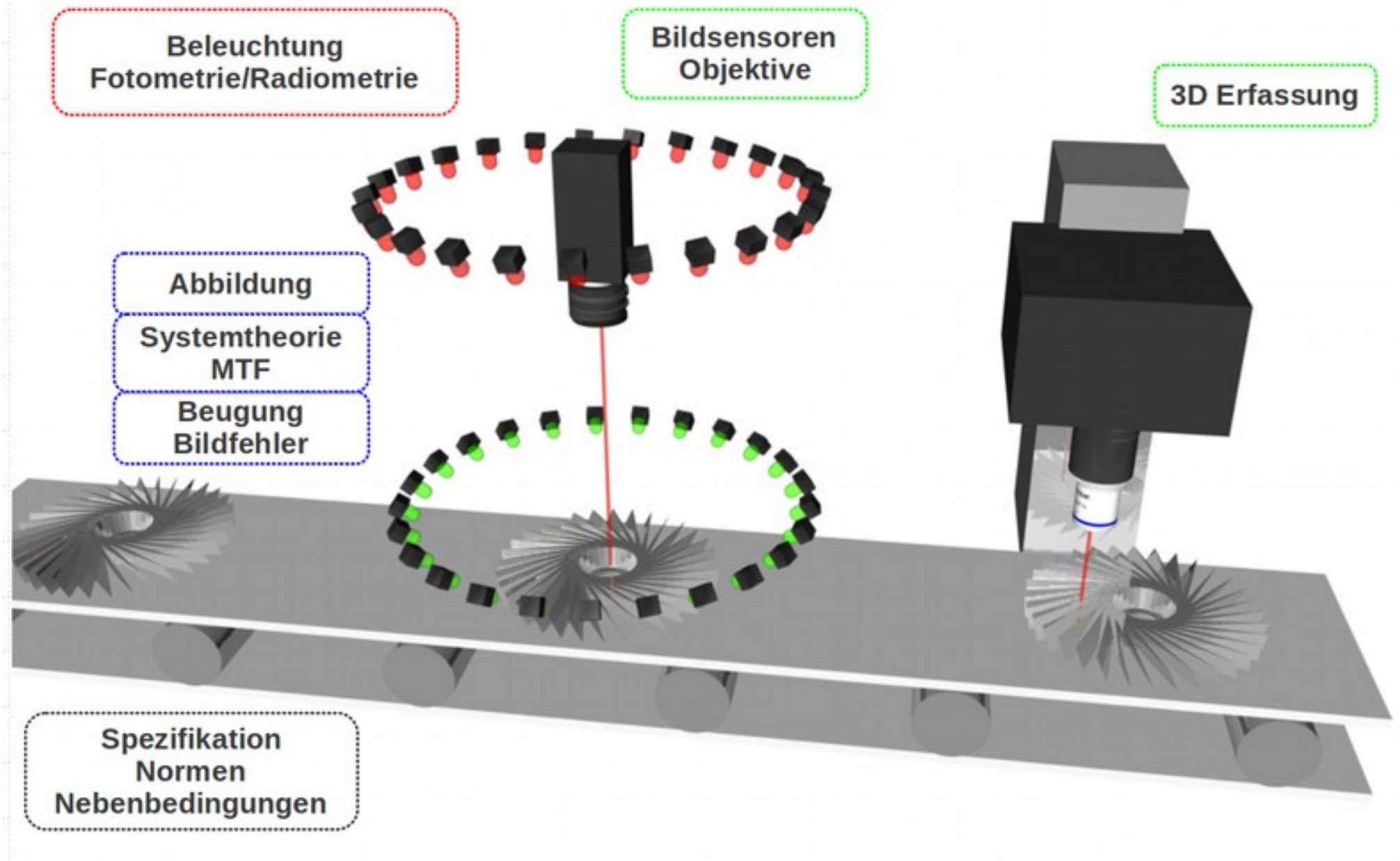


Heute: Sensoren

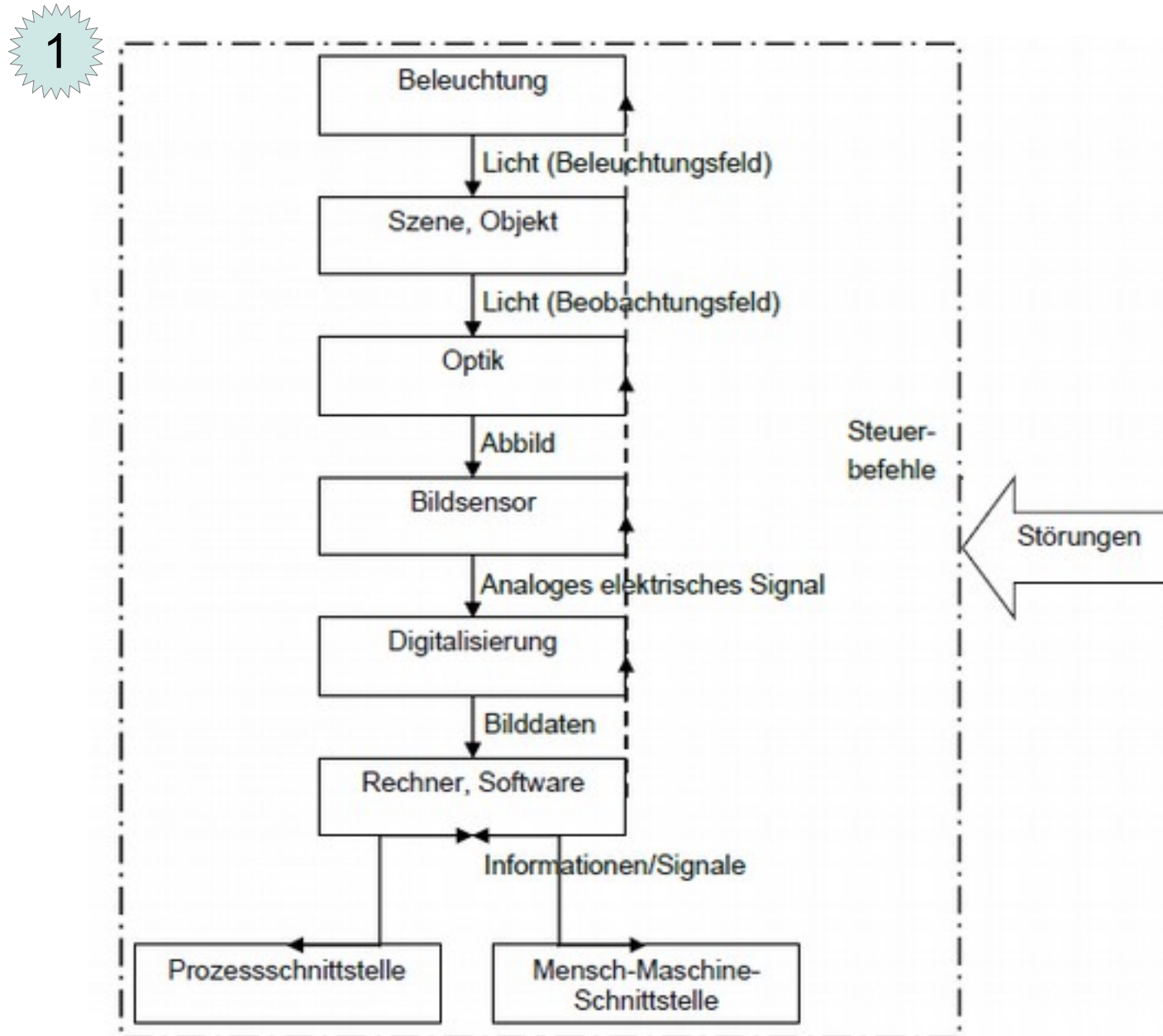


VDI 2632 Industrielle Bildverarbeitung

Begrifflichkeiten, Lastenheft, Pflichtenheft

Vom Anbieter spezifiziert

Vom Kunde spezifiziert



Schwerpunkte / was Sie nach der Vorlesung können sollten

- Signalentstehung „kennen“
- CCD / CMOS (Vor- und Nachteile)
- Kameradatenblatt „verstehen“: Bit, Pitch, Pixel, Framerate

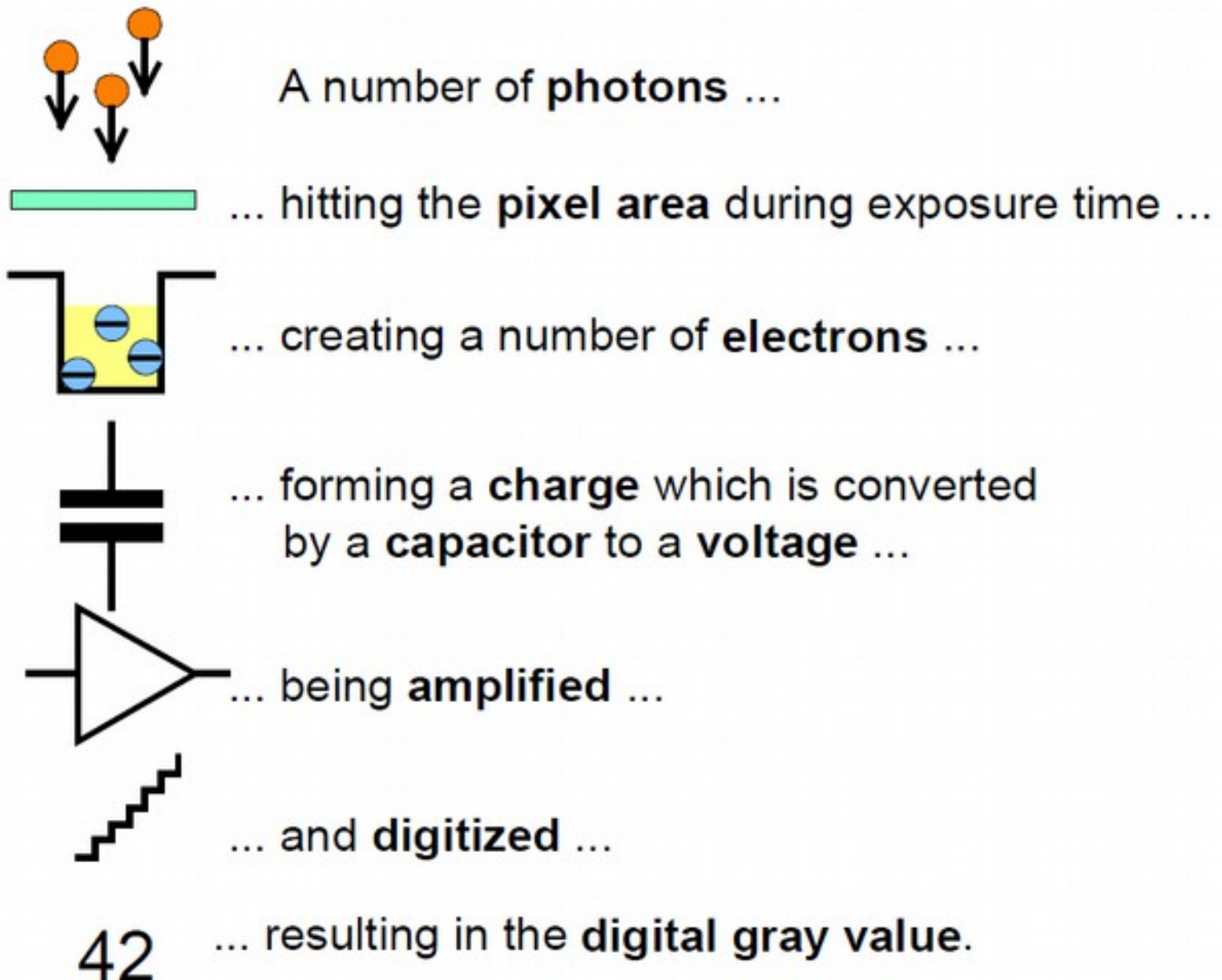
Übersicht



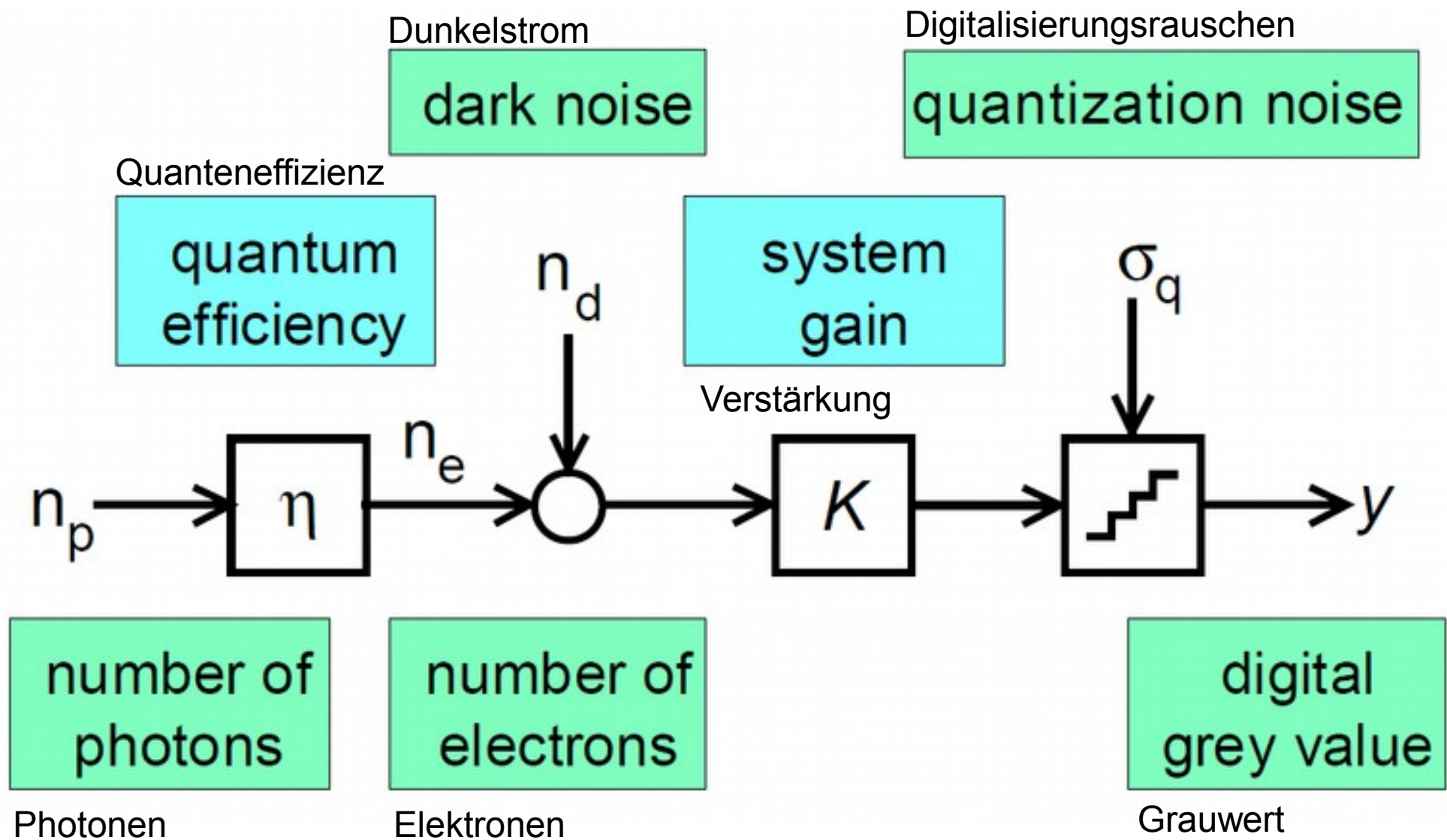
Übersicht

- Signalentstehung (EMVA 1288)
- Punktdetektoren
- Liniendetektoren
- Flächendetektoren → Sensortypen (CMOS, CCD)
- Schnittstellen
- C-Mount / CS-Mount
- Verschluss (Shutter)
- Dynamik, Rauschen, Sensitivität, ...
- Farbkameras
- Spezialdetektoren („Smart“ Kameras, ...)

Signalentstehung



Signalentstehung



Signalentstehung

Wichtige Kenngrößen einer Kamera:

- Quanteneffizienz (quantum efficiency) - η
- Dunkelstrom (dark current)
- Rauschen (noise)
- Sättigung (saturation)
- Signal zu Rauschverhältnis (signal to noise ratio / SNR)
- Dynamik (dynamic)

Rauschen

Quellen für das Rauschen einer digitalen Kamera sind:

- Verstärkerrauschen (Gaussverteilung), Ursachen: thermische, Kondensatoren (kTC Rauschen)
- Salz-und-Pfeffer-Rauschen (Fat-tailed-Verteilung, z.B. Cauchy-Verteilung), Ursache: Übertragungsfehler, AD-Wandler-Fehler, „Tote Pixel“
- Schrotrauschen (shot noise, Poisson-Verteilung), Ursache: Ungleichverteilung der auf den Sensor auftreffenden Photonen
- Quantisierungsrauschen (Normalverteilung)

Gegenmaßnahmen:

- Dunkelbildabzug
- Sensorkühlen
- Interpolation über mehrere Pixel

Was bedeutet SNR für eine Kamera?

$$\text{SNR}(\mu_p) = \frac{\eta \mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2 / K^2 + \eta \mu_p}}.$$

mit:

μ_p Photonenfluss

$\eta(\lambda)$ Quantenwirkungsgrad

σ_d^2 Dunkelrauschen

K Verstärkungsfaktor

σ_q^2 Quantisierungsrauschen

Dynamik, Rauschen - SNR

Zwei wichtige Grenzfälle:

$$\text{SNR}(\mu_p) \approx \begin{cases} \sqrt{\eta\mu_p}, & \eta\mu_p \gg \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \\ \frac{\eta\mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2}}, & \eta\mu_p \ll \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \end{cases}$$

- bei viel Licht, Rauschen durch Wirkungsgrad bestimmt
- selbst „ideale“ Kamera kann nicht weniger Rauschen als das Photonenrauschen haben!
- bei wenig Licht, Rauschen durch Dunkelrauschen (und Quantisierungsrauschen) bestimmt

Was bedeutet SNR für eine Kamera?

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{e^- Q_{eff} t}{\sqrt{N_{Shot}^2 + N_{CCD}^2 + N_{read}^2}} \\ &= \frac{e^- Q_{eff} t}{\sqrt{\left(\sqrt{e^- Q_{eff} t}\right)^2 + N_{CCD}^2 + N_{read}^2}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

mit:

N_{Shot}

Shot Noise

N_{CCD}

CCD Noise

N_{read}

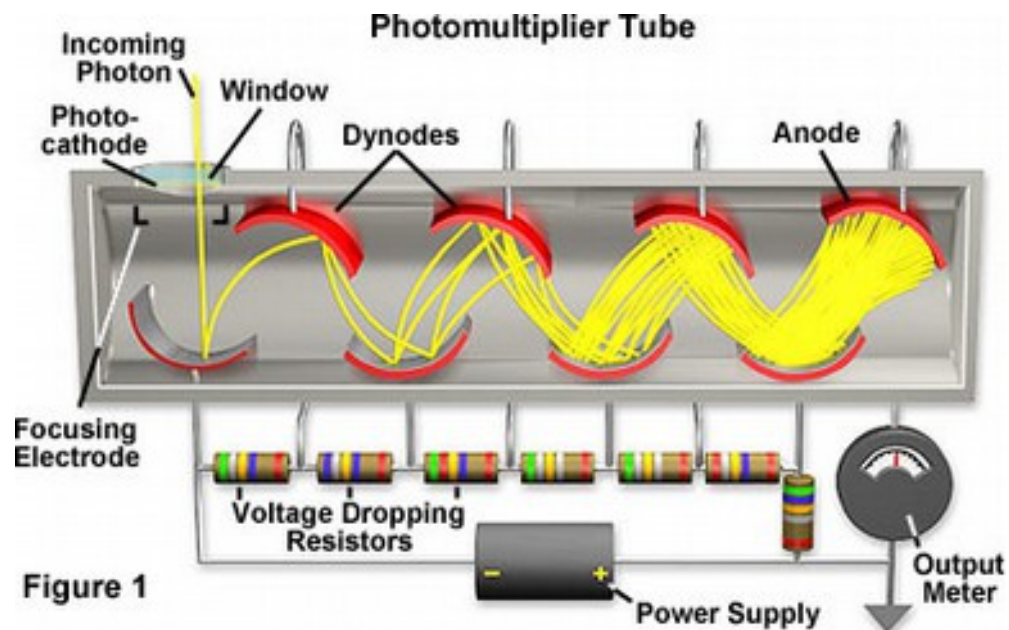
Read Noise

Q_{eff}

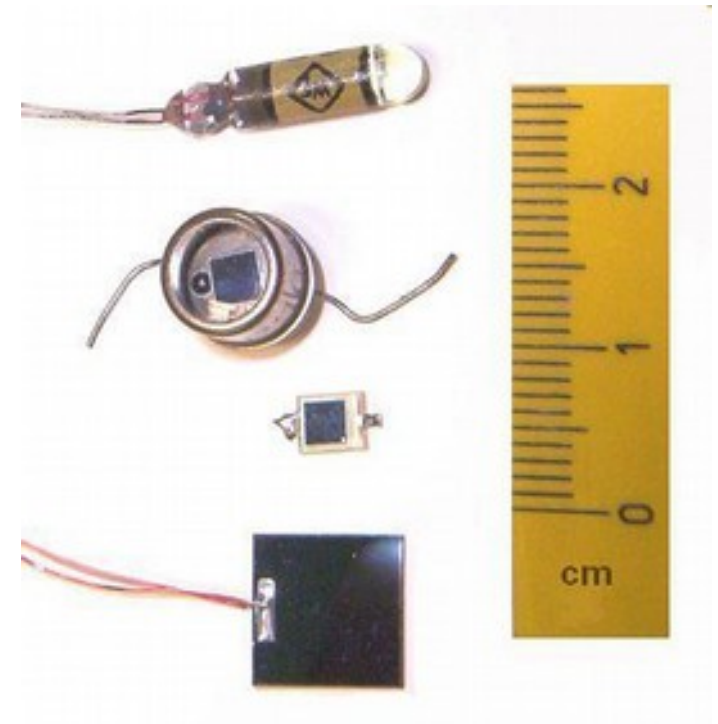
Quanteneffizienz

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



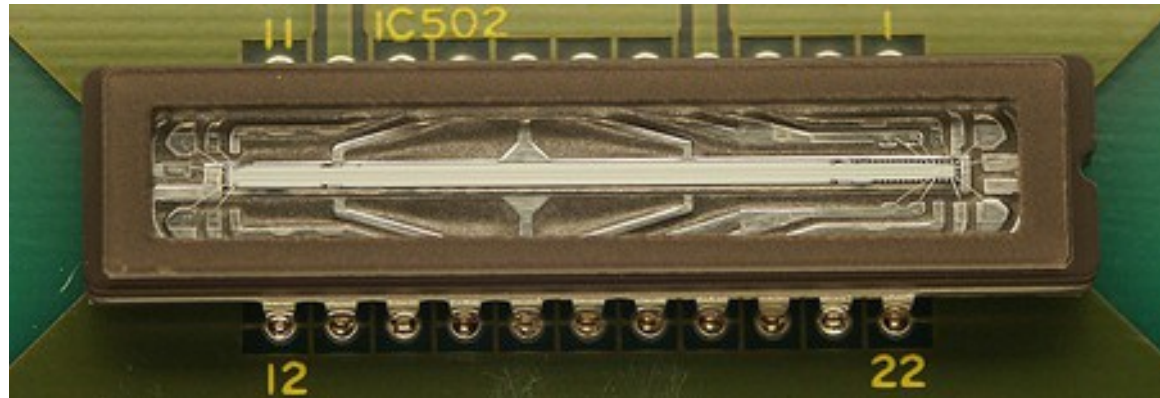
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/photomultipliers.html>



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

Linien-detektoren, Quadrantendioden

- 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 / CMOS)

Heutzutage zwei gebräuchliche Typen:

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

Früher waren Bildaufnahmeröhren üblich (Ikonoskop, Orthikon, Vidicon, ...)

Vidicon-Röhren werden heute noch für Spezialanwendungen eingesetzt

CCD - Sensortypen

CCD

Unterschiedliche Arten:

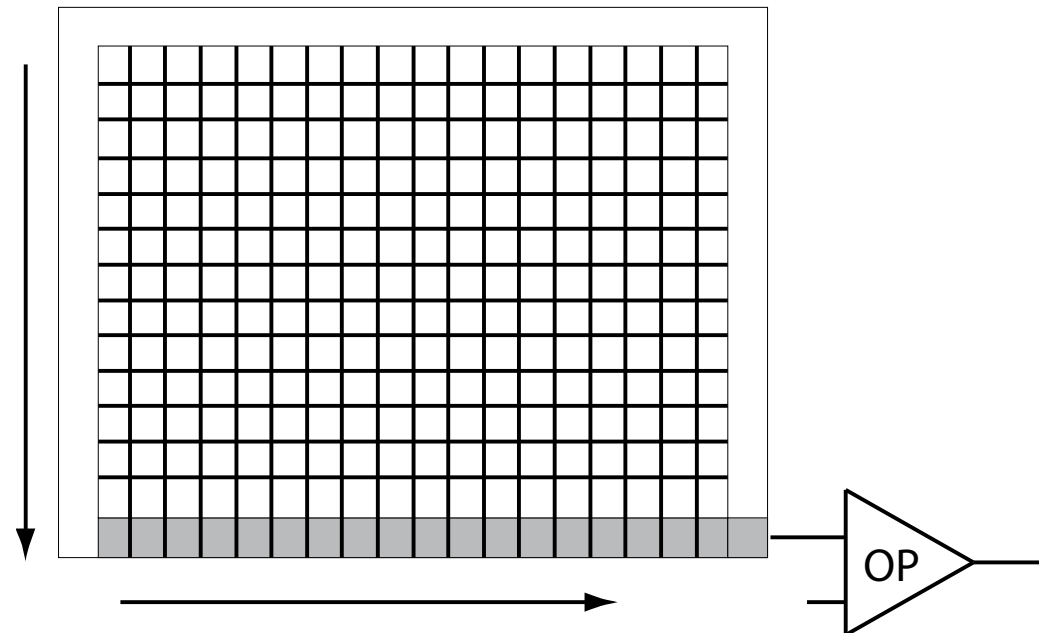
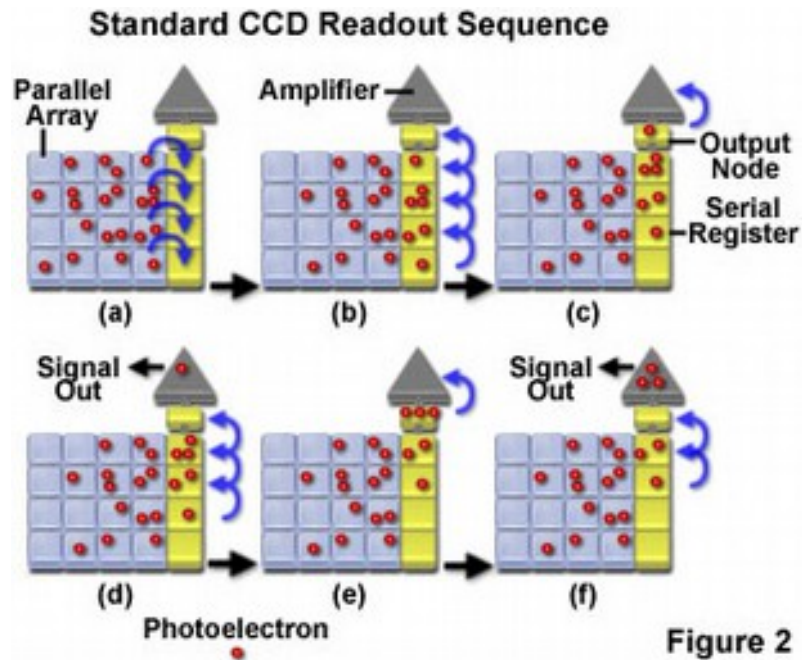
- „normal“
- **Interline-Transfer, Frame-Transfer, Frame-Interline-Transfer**
- Langsamer als CMOS
- Höhere Lichtsensitivität (da höherer Füllfaktor, speziell: **Fullframe**, Frametransfer Sensoren)
- Keine „Smart-Kameras“ möglich
- Normalerweise lineares Ansprechverhalten
- Zeigen üblicherweise Artefakte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

CCD - „normal“

CCD

Fullframe CCD Sensor Auslesen:

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

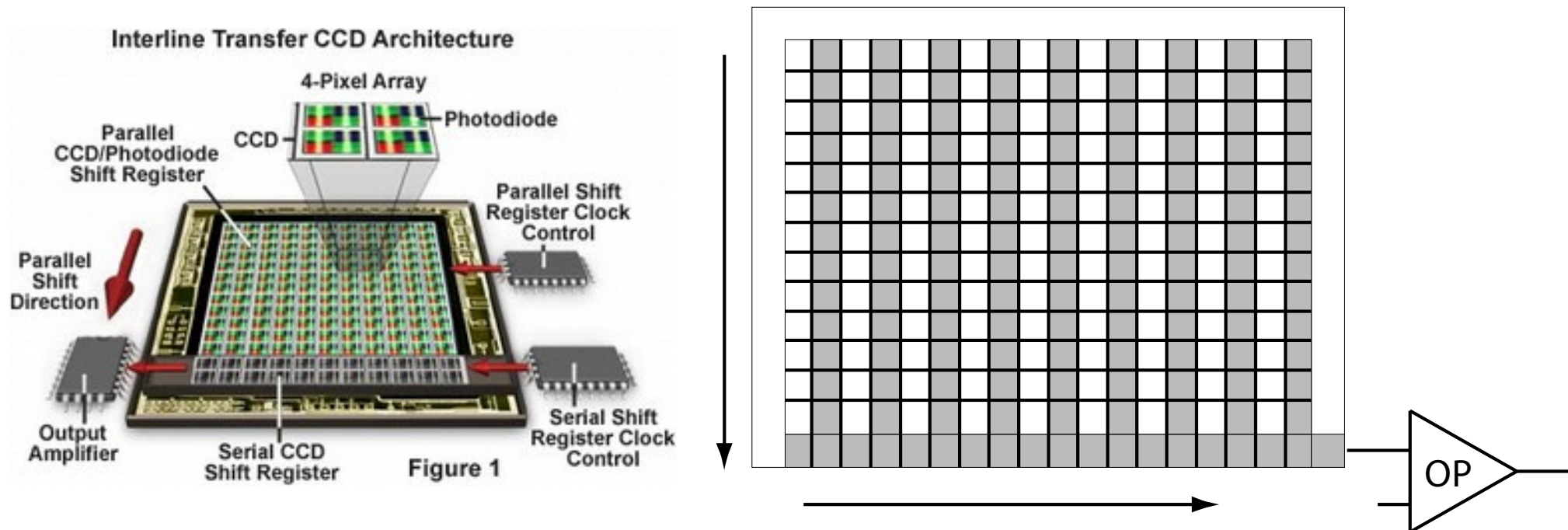


CCD - Interlinetransfer

CCD

Interlinetransfer (IT) CCD Sensor Auslesen:

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

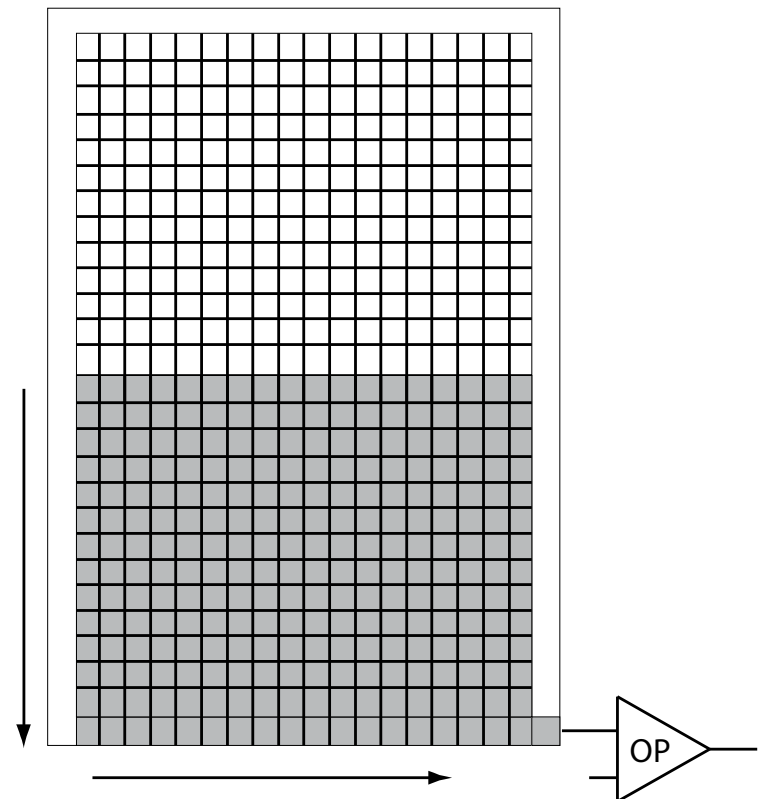
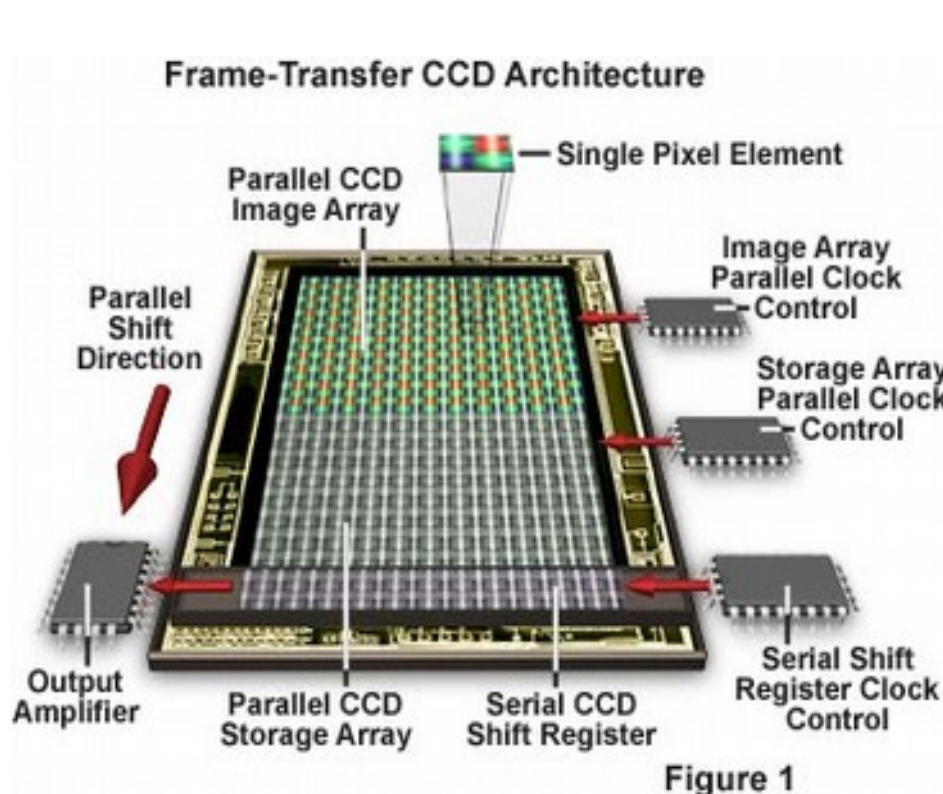


CCD - Frametransfer

CCD

Frametransfer (FT) CCD Sensor Auslesen:

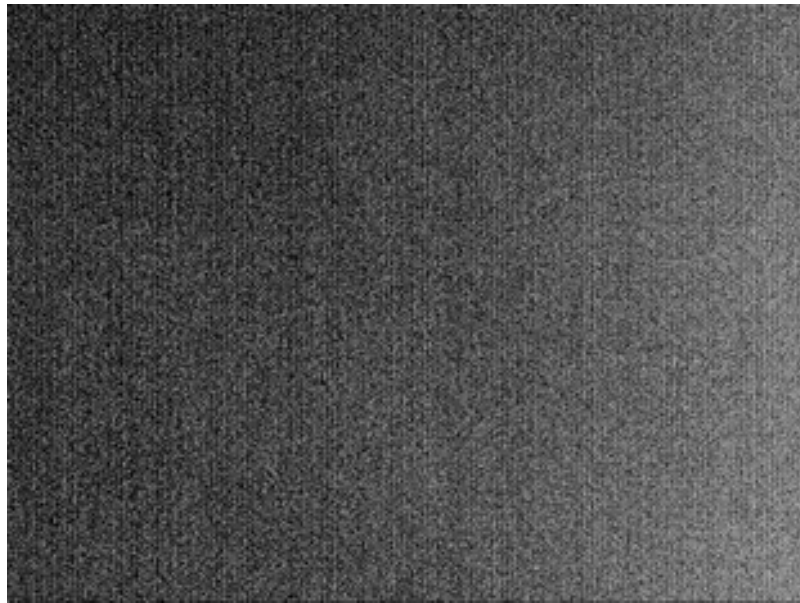
- Zuerst „schneller“ transfer des gesamten CCDs in abgedunkelten Bereich
- dann Signalaufbereitung (Verstärkung, AD Wandlung, ...)



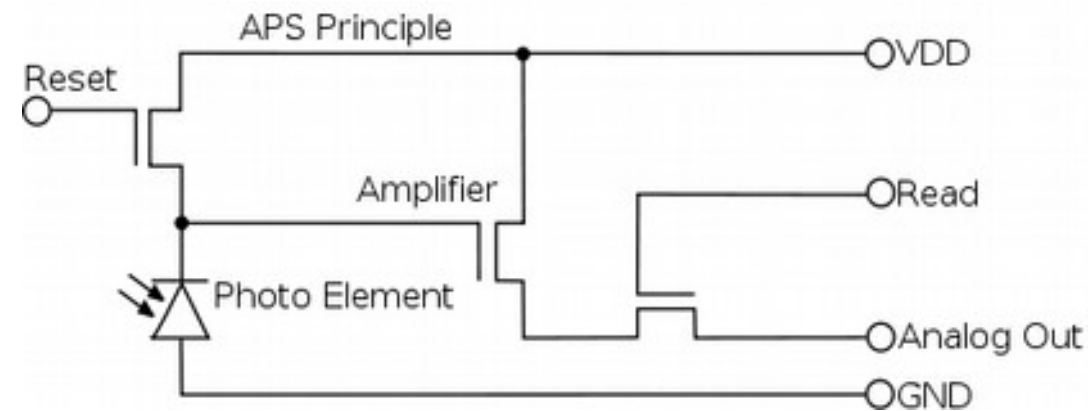
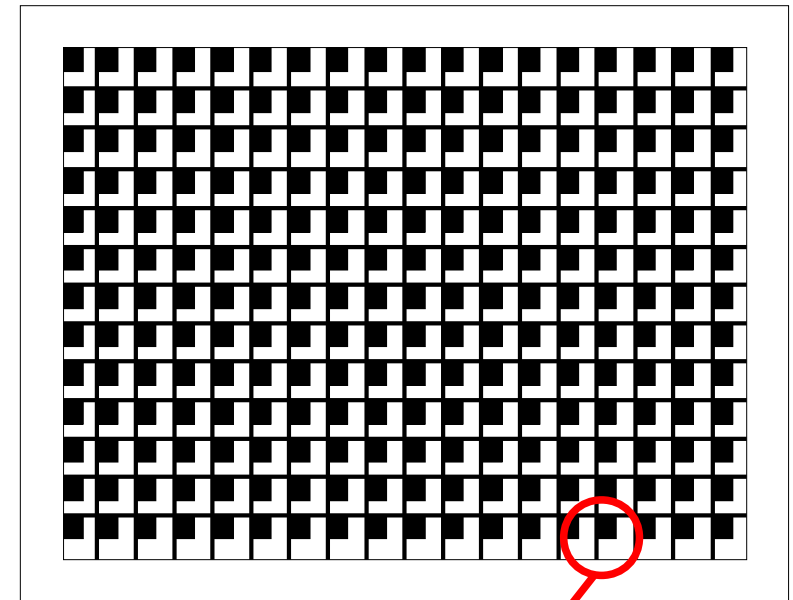
CMOS Sensoren

CMOS

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



FPN eines CMOS Sensors



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

Blooming, Smearing

- Lokale Überbelichtung eines CCD Sensors führt zu großflächigeren Überbelichtungen auf Grund durch „Überlaufen“ von Pixeln (Blooming)
- Überbelichtung / starke Belichtung während des Ausslesens führt zu Überbelichtungen von ganzen Zeilen / Spalten in „Auslese-Richtung“



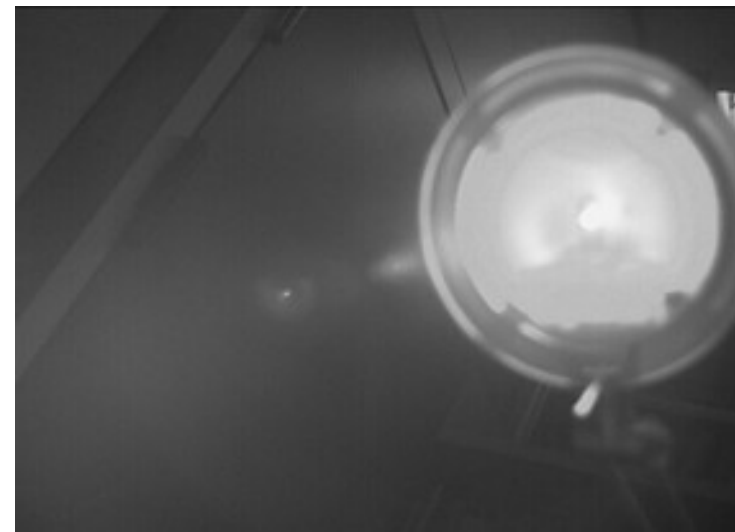
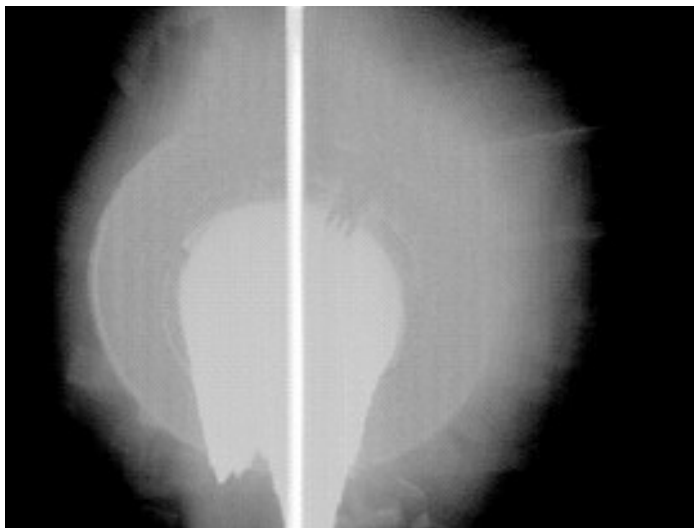
CCD-Sensor



CMOS-Sensor

CCD – CMOS Vergleich

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



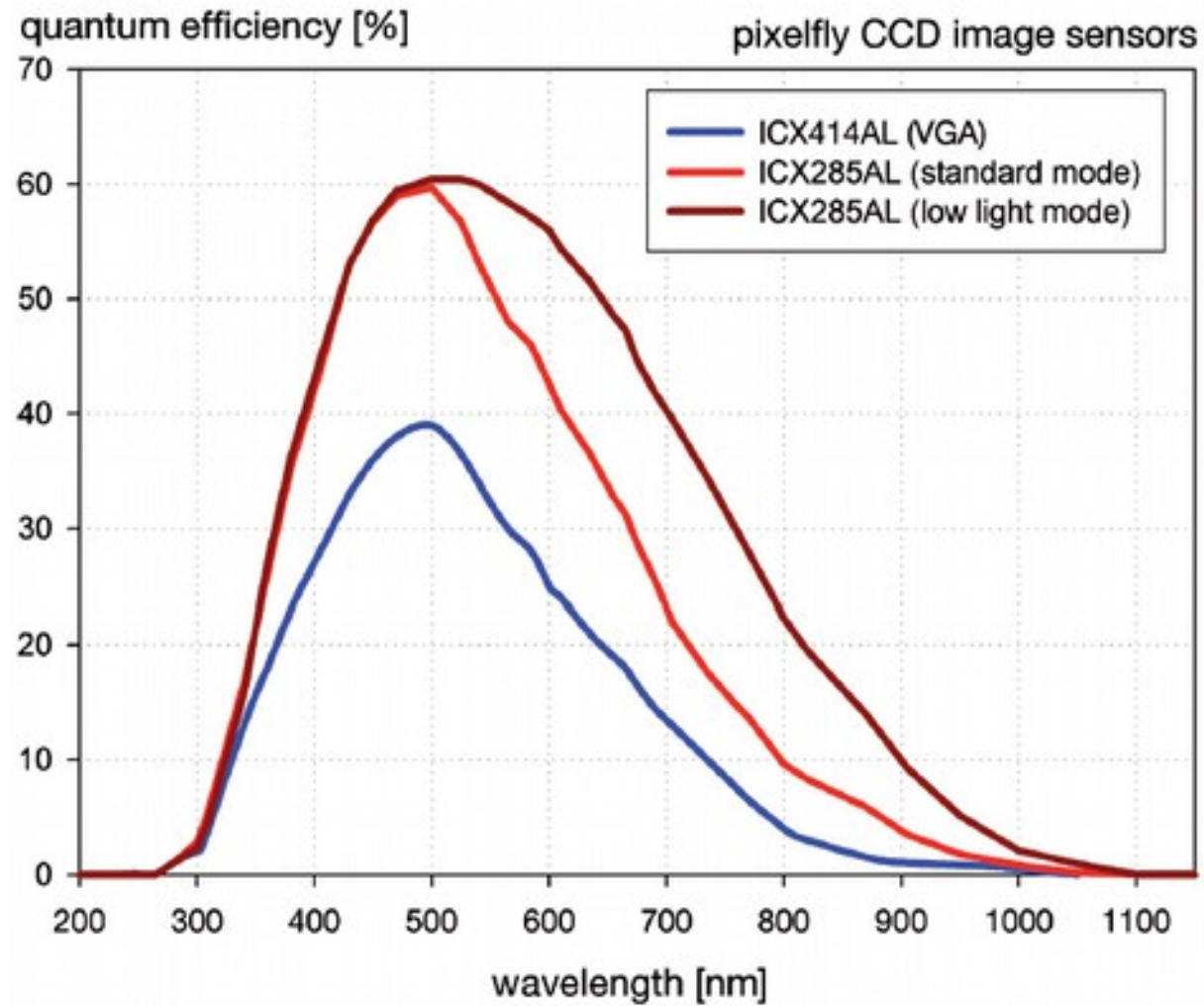
Kameradatenblatt

	unit	setpoint	pixelfly VGA	pixelfly qe
resolution (hor x ver) ¹	pixel		640 x 480	1392 x 1024
pixel size (hor x ver)	µm²		9.9 x 9.9	6.45 x 6.45
sensor format / diagonal	inch / mm		1/2" / 7.9	2/3" / 11.14
quantum efficiency	%	@ 500nm typical	40	62
full well capacity	e ⁻		30 000	18 000
image sensor			ICX414AL	ICX285AL
dynamic range	dB	CCD + camera	68.7	69.5
dynamic range A/D ²	bit		12	12
readout noise	e ⁻ rms	range / typical	11 .. 14 / 12	6 .. 9 / 7
imaging frequency, frame rate	fps	@ full frame / @ binning 2x ver / @ binning 4x ver	50 / 95 / 177	12 / 23 / -
pixel scan rate	MHz		20	20
A/D conversion factor	e ⁻ / count		6.5	3.8
spectral range	nm		290 .. 1100	290 .. 1100
exposure time	s		5 µs .. 65 s	5 µs .. 65 s
anti-blooming factor		@ 100 ms exposure time	> 1000	> 400 @ standard / > 4 @ low light mode
smear	%		0.005	0.002
binning horizontal	pixel		1, 2	1, 2
binning vertical	pixel		1, 2, 4	1, 2

Kameras: PCO-Pixelfly (VGA, qe), mit freundlicher Genehmigung der PCO AG (<http://www.pco.de>)

	unit	setpoint	pixelfly VGA	pixelfly qe
region of interest			no	no
extinction ratio		@ 1ms exposure time	1 : 2000	1 : 2000
non linearity (differential)	%	full temperature range	< 2	< 2
uniformity darkness DSNU ³	count	@ 90% center zone	1	1
uniformity brightness PRNU ⁴	%	typical	1.0	1.0
trigger, auxiliary signals		internal / external	software / TTL level, 24V	software / TTL level, 24V
power consumption	W		12	12
power supply	VAC		via PCI board	via PCI board
camera dimensions (w x h x l)	mm³		39 x 39 x 53	39 x 39 x 53
weight	kg	camera	0.26	0.26
operating temperature range	°C		+10 .. +40	+10 .. +40
operating humidity range	%	non condensing	10 .. 90	10 .. 90
storage temperature range	°C		-20 .. +70	-20 .. +70
optical input			c-mount	c-mount
optical input window			fused silica	fused silica
data interface			PCI, compact PCI	PCI, compact PCI
interframing time	µs		5	5
CE certified			yes	yes

Kameradatenblatt



Dynamik, Rauschen

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

Sensorgröße (Diagonale):

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

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

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

Eine 1" Bildsensorröhre hat 16,4mm aktive Fläche → wird als Maß für digitale Bildsensoren verwendet, daher:

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

Dynamik, Rauschen

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

Dynamik angegeben in dB (logarithmisch) dB (Feldgrößen):

$$dyn = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.1)$$

Intensitäten sind quadratische Größen damit gilt für Kameras:

$$dyn = 10 \log \left(\frac{P_1^2}{P_2^2} \right) = 20 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.2)$$

Wie groß ist die Dynamik der beiden Kameras (in „realen“ ADUs)?

$$68,7 = 20 \log \left(\frac{4095}{ADU_{min}} \right) \rightarrow ADU_{min} \approx 1,5$$

$$69,5 = 20 \log \left(\frac{4095}{ADU_{min}} \right) \rightarrow ADU_{min} \approx 1,4$$

$$12 \text{ bit} = 4095 \text{ ADU}$$

Dynamik, Rauschen

Eine Kamera hat eine Graustufenauflösung von 12Bit von einem experimentell ermittelten (mittleren) Dunkelwert von 40ADUs. Welche effektive Dynamik hat sie?

$$dyn = 20 \log \left(\frac{4095}{40} \right) = 40,2 \text{ dB}$$

Welche einfache Möglichkeit zur Rauschreduktion kann angewendet werden um das Rauschen unter 1 ADU zu verringern?

- Mittelung (Signalstärke nimmt um Faktor n für n Mittelungen zu, Rauschstärke nur um Faktor $\sqrt{n}$)

$$\rightarrow \sqrt{n} = 3 \rightarrow 9 \text{ Bilder}$$

Dynamik, Rauschen

readout noise	e^- rms	range / typical	11 .. 14 / 12	6 .. 9 / 7
---------------	-----------	-----------------	---------------	------------

Was bedeutet „readout noise“ $13e^-$?

A/D conversion factor	e^- / count		6.5	3.8
-----------------------	---------------	--	-----	-----

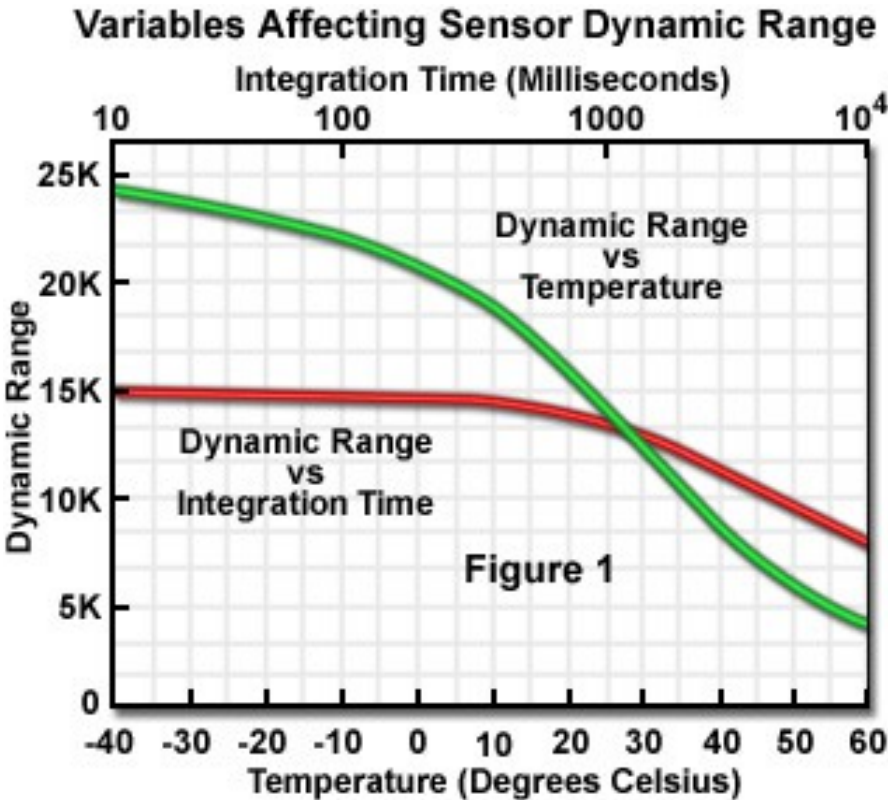
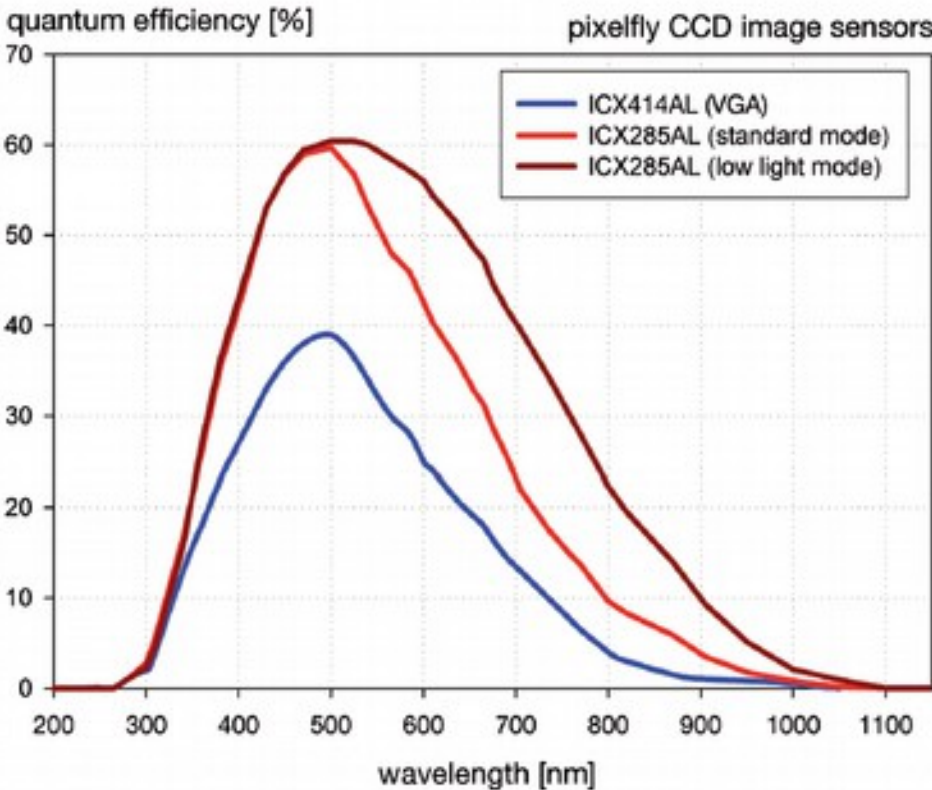
$$14/6,5 = 2,2 \text{ ADU}$$

$$9/3,8 = 2,4 \text{ ADU}$$

Wieviele e^- „braucht“ man denn jetzt für 1 ADU, oder ist das Signal „wertekontinuierlich“ oder „wertediskret“?

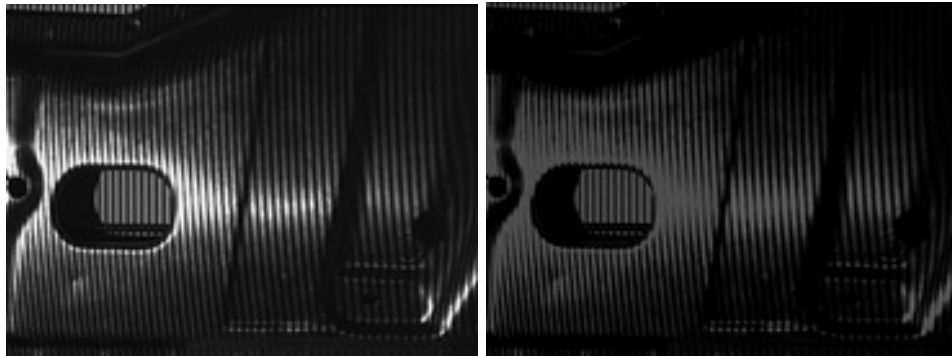
Dynamik, Rauschen

quantum efficiency	%	@ 500nm typical	40	62
--------------------	---	-----------------	----	----



Erhöhung der Kameradynamik durch:

- Höhere Graustufenauflösung („mehr Bit“)
- Logarithmische Kameras
- Mehrfachbelichtungen (s. auch „HDR-Fotografie“)



Aufgabe - Kameraauswahl

Drei Fallbeispiele, Auswahl einer passenden Kamera:

1. Fahrerassistenzsystem

2. Kamera für Teleskop

3. Handykamera

Fahrerassistenzsystem



Kamera für Fahrerassistenzsystem – Anforderungen:

- Hohe Dynamik, geringes Übersprechen
(Gegenlichtsituationen, z.B. Sonne, Gegenverkehr)
- Schnell
- Robust (-40°C / $+80^{\circ}\text{C}$), große Beschleunigungen

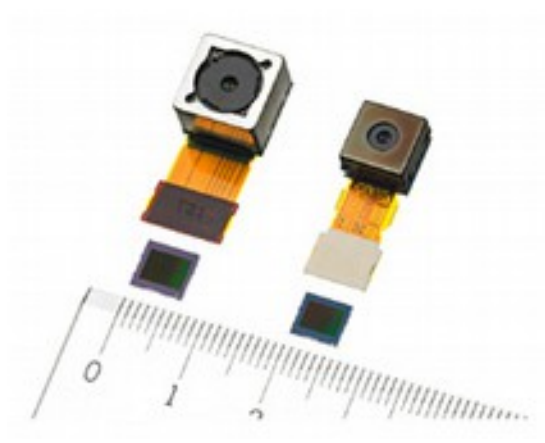
Telekop



Kamera für Teleskop

- Hohe Dynamik (hohe Fullwell-Cap., geringer Readout-Noise)
- Rauscharm (gutes = großes SNR)
- Sensitiv (hoher Füllfaktor, hohe Quanteneffizienz)

Handy-Kamera



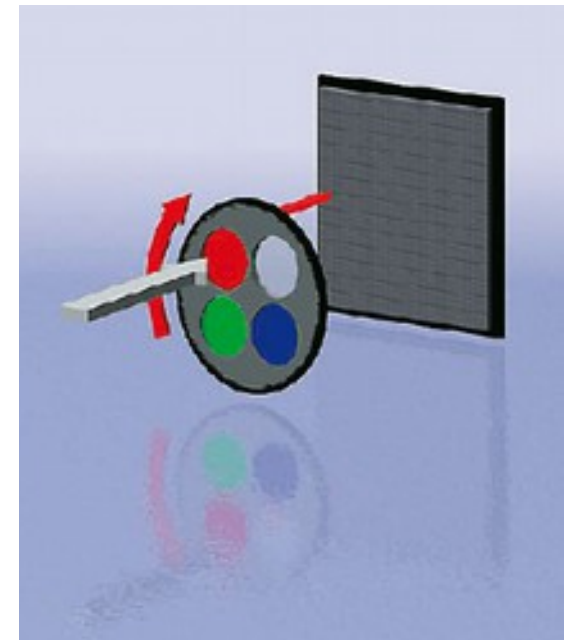
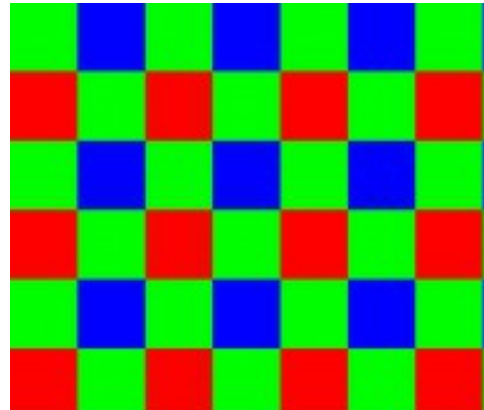
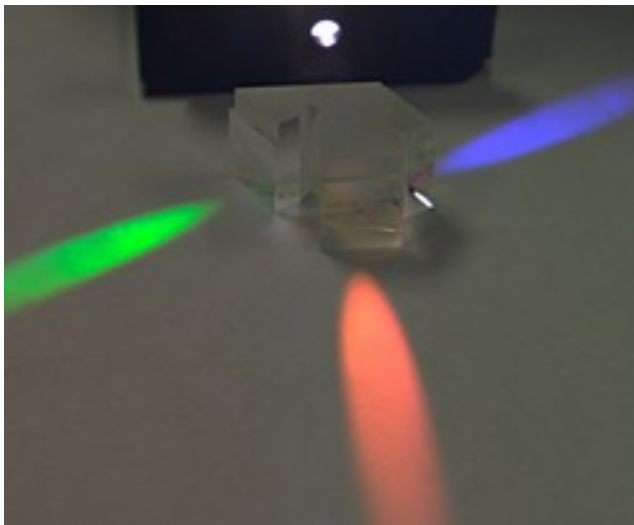
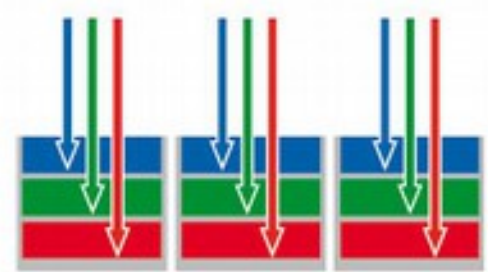
Kamera für Handy

- Viele Pixel
- klein
- billig
- Geringer Stromverbrauch

Farbdetektion

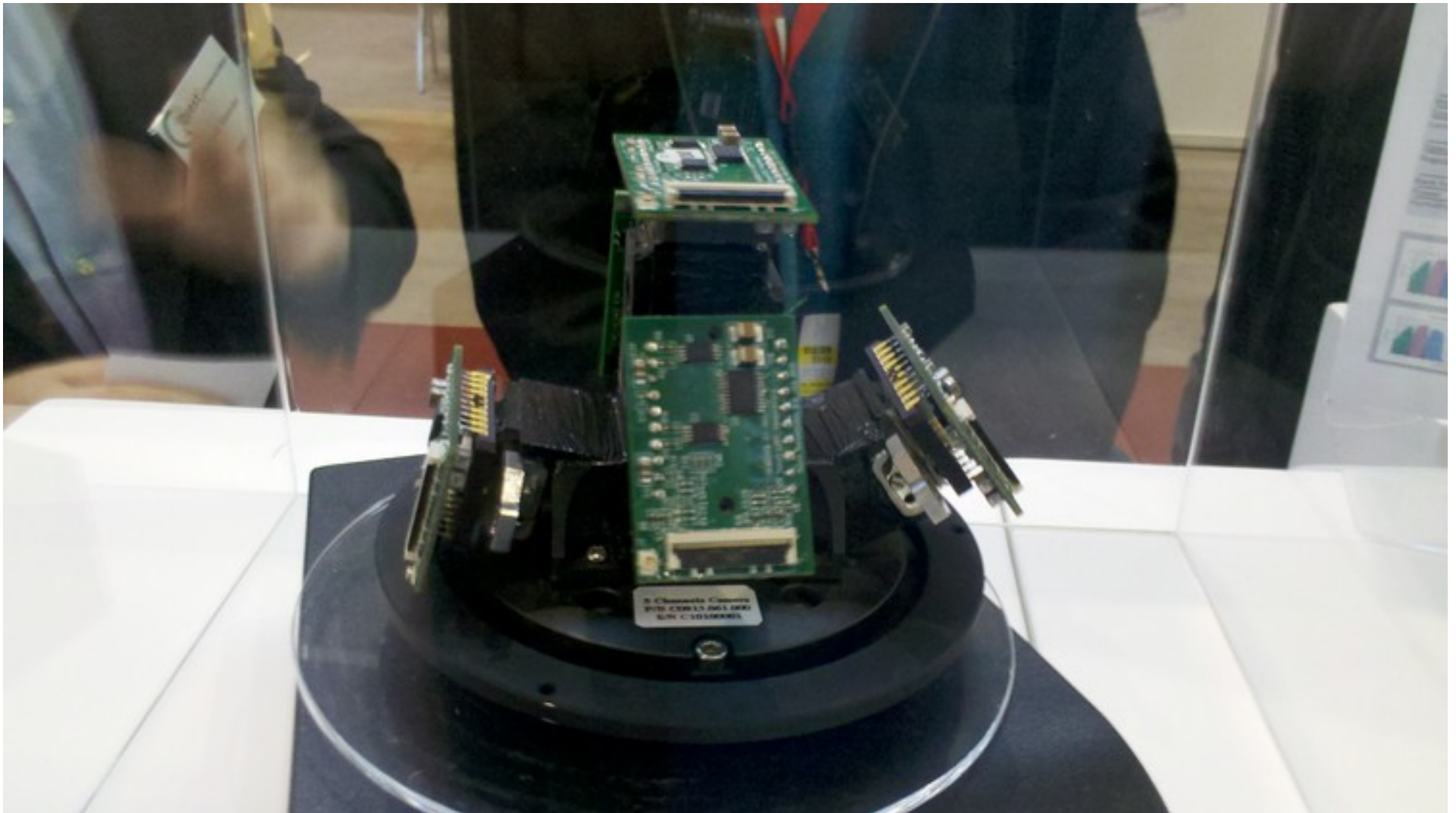
Folgende Typen von Farbkameras gebräuchlich:

- Bayer Pattern (lateral separiert)
- Mit Farbrad (zeitlich separiert)
- Foveon Sensor
- Farbprisma (3 CCD – 6 CCD)

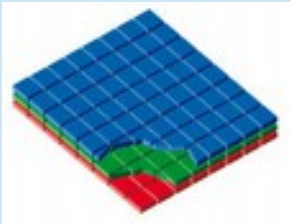
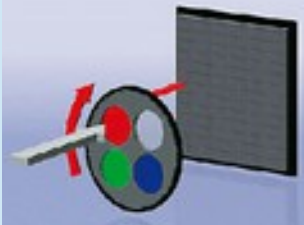
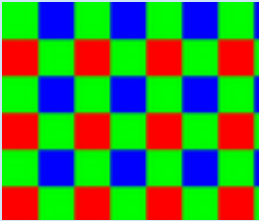
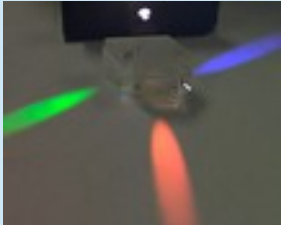


Farbdetektion

5 CCD Farbkamera

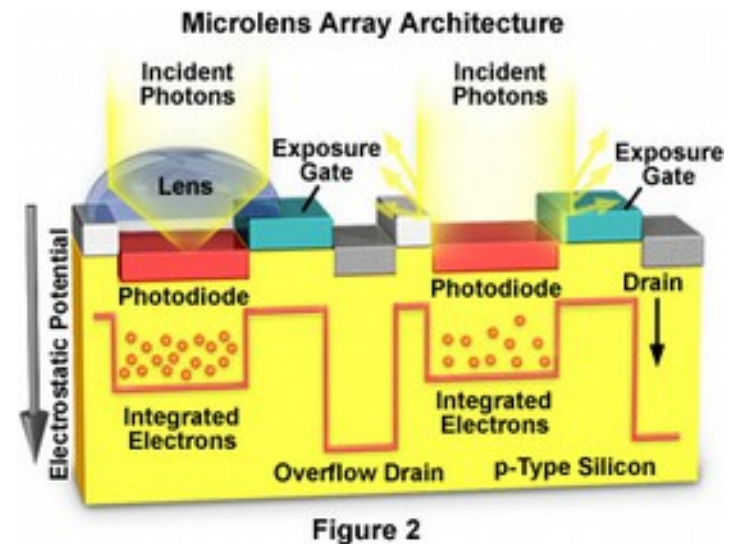
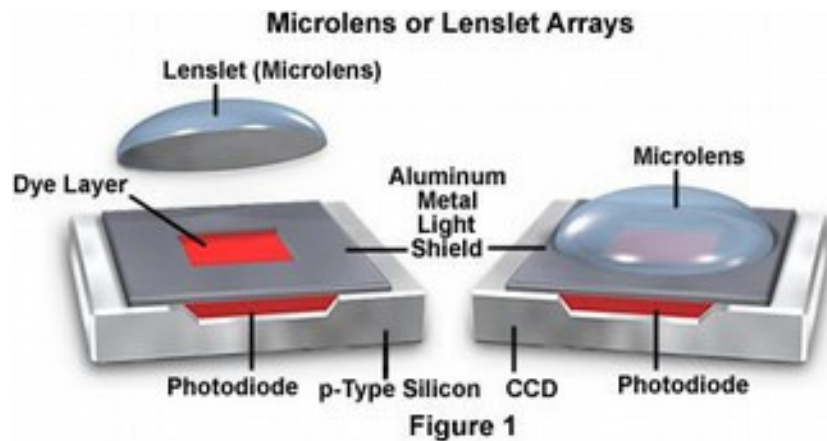


Farbdetektion

		Farbtrennung	Laterale Auflösung	Geschwindigkeit	Optikkonstruktion
Foveon		O	+	+	O
Farbrad		+	+	-	-
Bayer		+	-	+	+
Prisma		+	+	+	-

Mikrolinsen

- 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



Verschluss (Shutter)

- Bei Digitalkameras werden üblicherweise digitale Shutter verwendet, früher (und auch bei dig. Spiegelreflex) wurden Schlitzverschlüsse verwendet
- Es gibt zwei Arten „digitaler Shutter“:
 - Global Shutter (das ganze Bild wird gleichzeitig belichtet)
 - Rolling Shutter (der Shutter läuft wie beim Schlitzverschluss über das Bild hinweg). Dies kann zu Artefakten führen
 - Bei Cmos Kameras ist der GS g



Schnittstellen

Analog:

- CCIR
- NTSC
- PAL
- RS170
- Progressive Scan

Bezeichnung	Auflösung	Framerate
CCIR	768x576 mono	25fps
RS170	640x480 mono	30 fps
PAL	768x576 farbe	25 fps
NTSC	640x480 farbe	29,97 fps

<http://www.vision-doctor.de/analog.html>

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5681>

- Es werden Koaxkabel mit BNC Steckern verwendet (bei Progressive Scan ist Hirose üblich)
- Kabellängen > 100m möglich
- Roboterarm taugliche Kabel sind verfügbar
- CCIR, NTSC, PAL und RS170 sind interlaced (es werden abwechselnd gerade und ungerade Bildzeilen übertragen)
- Es wird ein „Framegrabber“ benötigt
- Durch Framegrabber ist Bittiefe der Kamera „variabel“ z.B. 8 / 10 Bit

Schnittstellen

Digital:

- USB
- FireWire
- GigE (Gigabit Ethernet)
- CameraLink

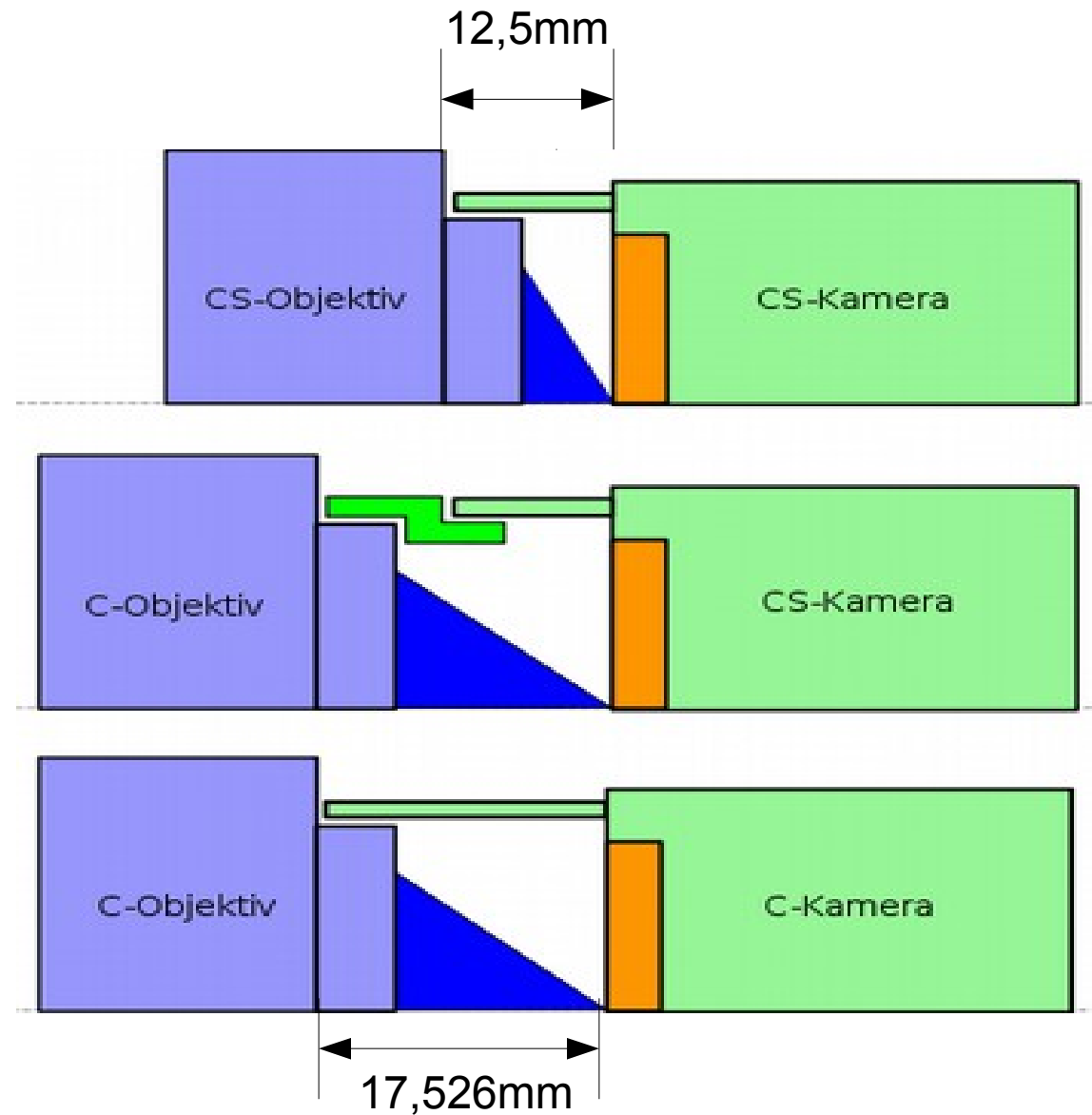


Bezeichnung	Bandbreite	Kabellänge	# Kameras
Analog	Typ. Bis 30 MB/s, max. 600MB/s	> 100m	Bis 4
USB 2.0	42 MB/s	< 10m	Bis 127
USB 3 (Vision)	ca. 600 MB/s	5m	Bis 127
1394 a/b	32 / ~95 MB/s	< 10m, mit Glasfaser 100m	Bis 16 / 63
GigE	90-100 MB/s	< 100m	unbegrenzt
CameraLink	255 MB/s (base) 750 MB/s (full)	Max. 10m (abh. von Datenrate	Bis 2

Objektiv Anschlüsse

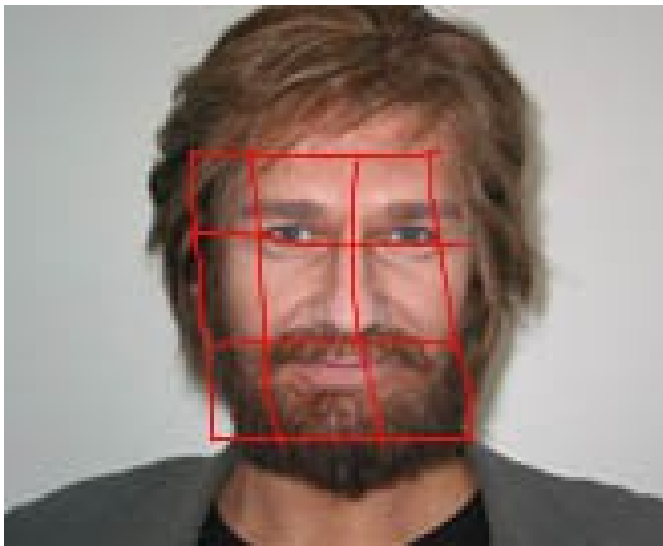
Es gibt zwei gebräuchliche Objektiv-Verschraubungen für BV Kameras:

- C-Mount
- CS-Mount



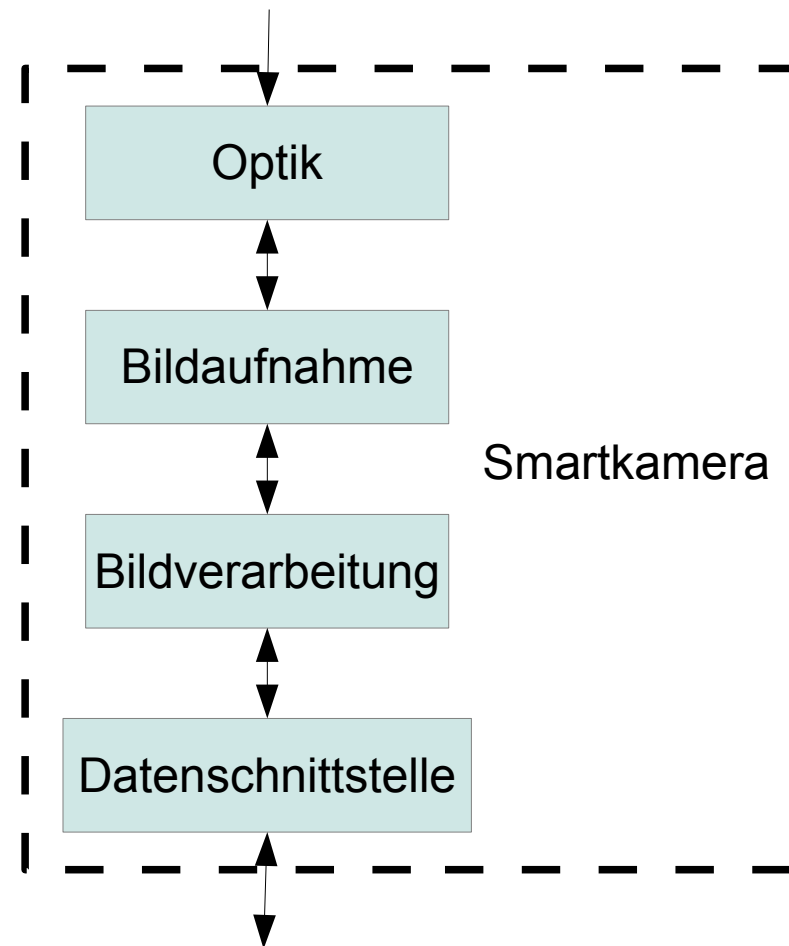
Smart Kameras

- **Smart-Kamera** ist ein Überbegriff für eine Vielzahl unterschiedlichster Kamerasysteme.
- Häufig werden damit Kameras bezeichnet, die eine Hochgeschwindigkeits Datenverarbeitung integriert haben
- Die implementierten/-baren Funktionen reichen von „einfachen“ Filtern bis zu komplexen Verarbeitungsoperationen (z.B. Gesichtserkennung, Markerdetektion, Auswertung von Interferenzsignalen, ...)



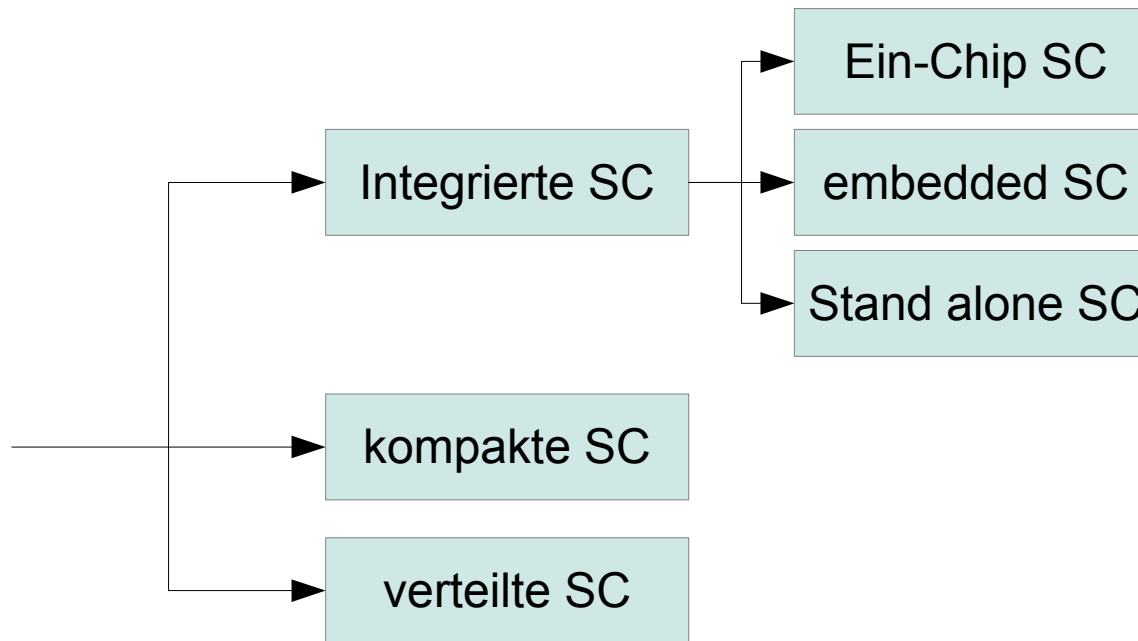
Smart Kameras

- **Smart-Kamera** ist ein Überbegriff für eine Vielzahl unterschiedlichster Kamerasysteme.
- Häufig werden damit Kameras bezeichnet, die eine Hochgeschwindigkeits Datenverarbeitung integriert haben



Smart Kameras

- Eine Klassifizierung von **Smart-Kameras** ist schwierig, es gibt keinen Standard. Eine Möglichkeit ist:

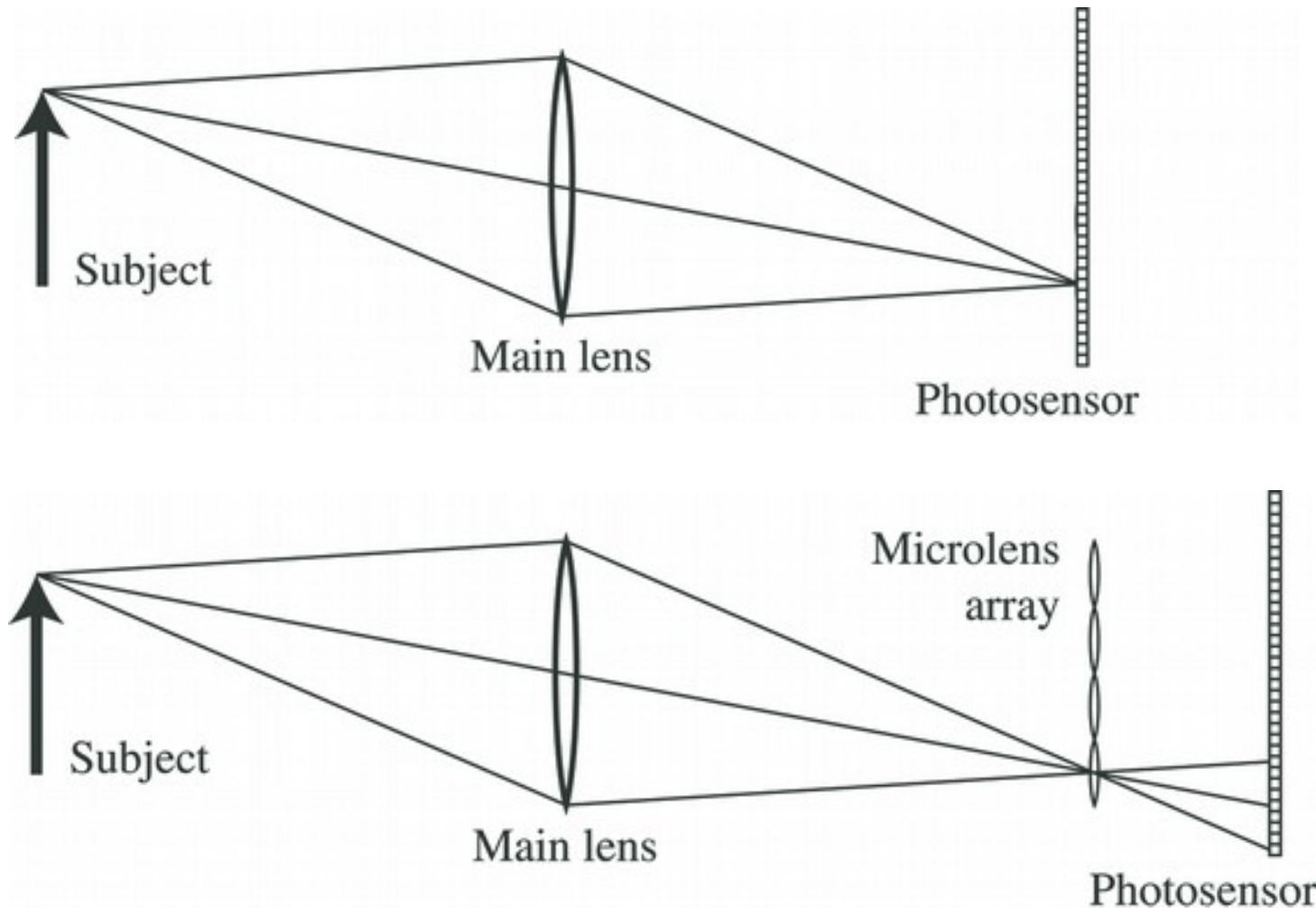


Smart Kameras

	Eigenschaften	Anwendungen
Ein-Chip	Bildsensor und Auswerteelektronik auf dem gleichen Chip	Spielzeug, Umweltsensoren
Embedded	In ein Gerät eingebautes System	Optische Maus, Handy, Fingerabdruck-Scanner
Stand Alone	„normale“ SC, SC System hat eigenes, kompaktes Gehäuse	Maschinelles Sehen
Kompakte	Auswerteelektronik ist vom Kamerasystem getrennt, aber nahe (kurze Kabellängen)	Sicherheitssysteme, Verkehrsüberwachung, maschinelles Sehen
Verteilte	Auswertung erfolgt durch Vernetzung mehrerer Komponenten (kameras, Datenverarbeitung, ...)	Verteilte Videoüberwachung, maschinelles Sehen mit Sensornetzwerk

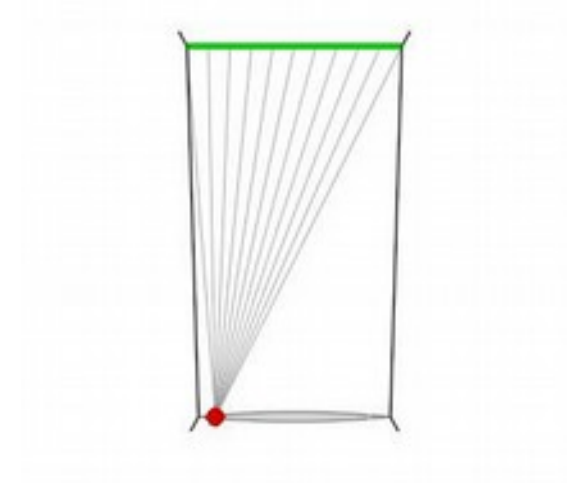
„Lichtfeld“ Kameras

- Aufnahme von Intensität und Richtung für jeden „Kamera-Pixel“



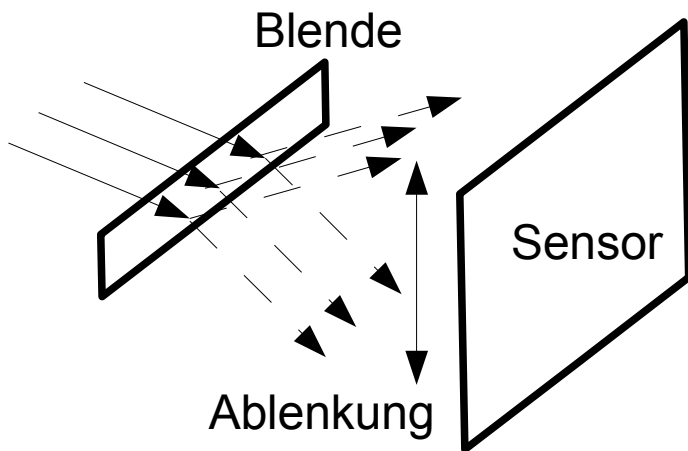
„Lichtfeld“ Kameras

- „Refokussierung“ von Bildern
- Änderung des Blickwinkels
- Berechnung von 3D Information



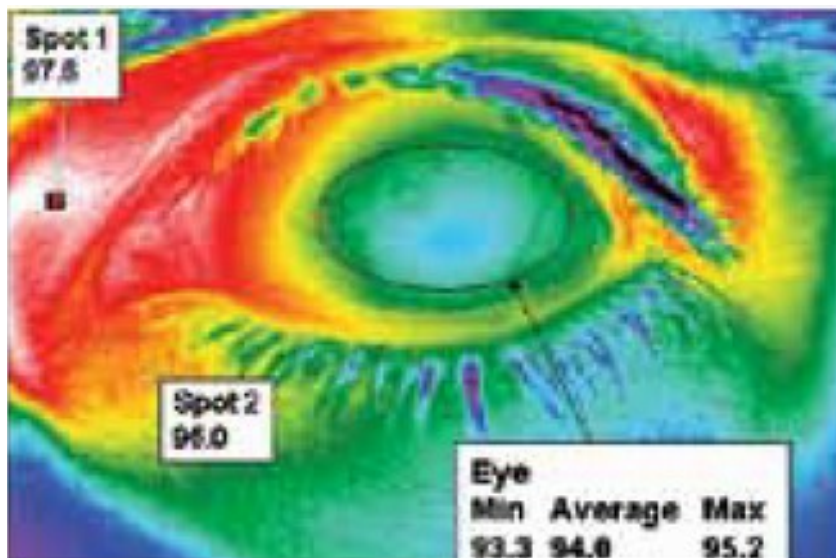
Hochgeschwindigkeits Kameras

- Hochgeschwindigkeitskameras gibt es bis ca. 6Mio Bilder/s (200Mio Bilder/s)
- Höchstgeschwindigkeits Kameras haben geringe Auflösung, bei Crashtests werden 1024x768 bis 2048x2048 pixel bei max. 7000 Bilder/s verwendet
- Höchste Geschwindigkeiten werden mit „Streak-Kameras“ erreicht
- Hierbei das Bild einer Blende über einen Sensor abgelenkt



Wärmebildkameras

- Auf Silizium basierende Kameras haben einen eingeschränkten spektralen Sensitivitätsbereich
- Gründe hierfür sind:
 - Silizium ist im Infrarotbereich „durchsichtig“
 - Die Kameras sind mit Filtern ausgestattet (UV, IR Sperrfilter)
- Wärmebildkameras haben geringe Auflösung (bis ca. 1024x1024px)
- Unterliegen häufig Exportbeschränkungen



Miniatürkameras

- S/W und Farbkameras ab ca. 3mm Durchmesser sind am Markt verfügbar
- Auch Kameras mit integrierter LED Beleuchtung, wassergeschützt

