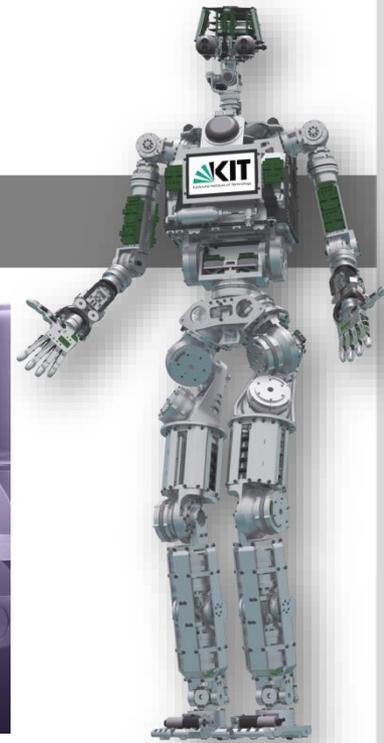
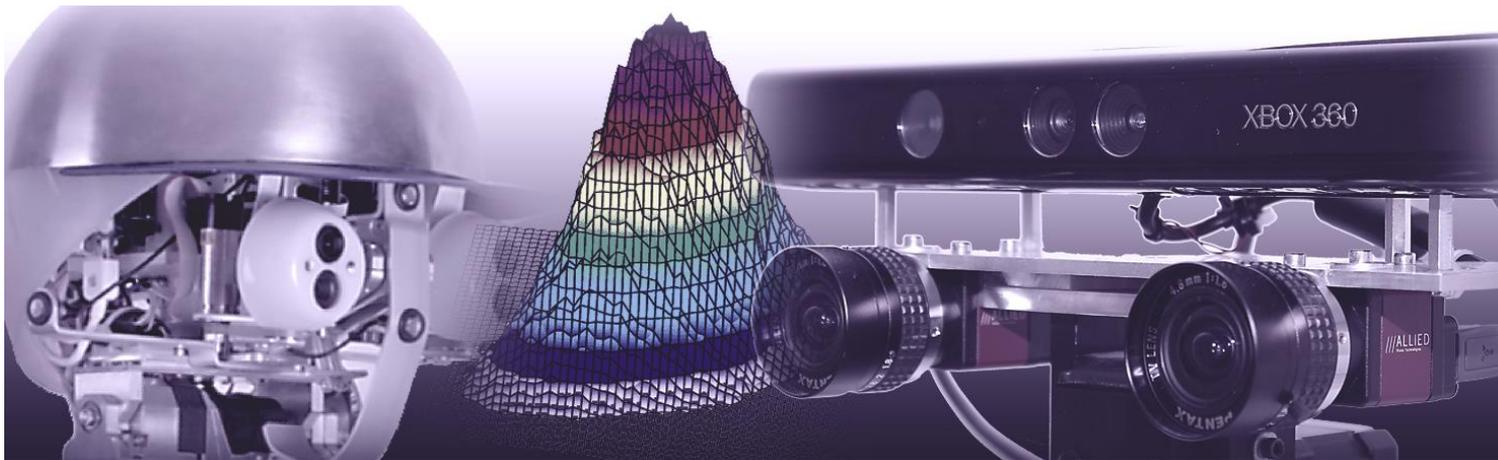


# Robotik III: Sensoren in der Robotik

## Visuelle Sensoren

Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR),  
Humanoids and Intelligence Systems Lab (HIS) & High Performance Humanoid Technologies (H<sup>2</sup>T)



<http://www.humanoids.kit.edu>

<http://h2t.anthropomatik.kit.edu>

# Externe Sensoren

## Externe Sensoren

### Taktile Sensoren

Tastende & gleitende Sensoren

Kraft-  
Momenten-  
Sensoren



### Näherungssensoren

Kapazitive Sensoren

Optische Sensoren

Akustische Sensoren



### Abstands Sensoren

Laufzeitbasiert

Triangulationsbasiert



### Visuelle Sensoren

Photodioden  
CCD

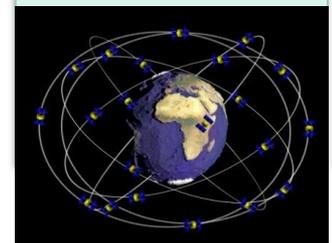
Algorithmik:  
Lichtschnitt,  
Stereo



### Positions Sensoren

GPS

Natürliche/  
künstliche  
Landmarken



# Visuelle Sensoren – Augen der Maschine

## ■ Anwendungen

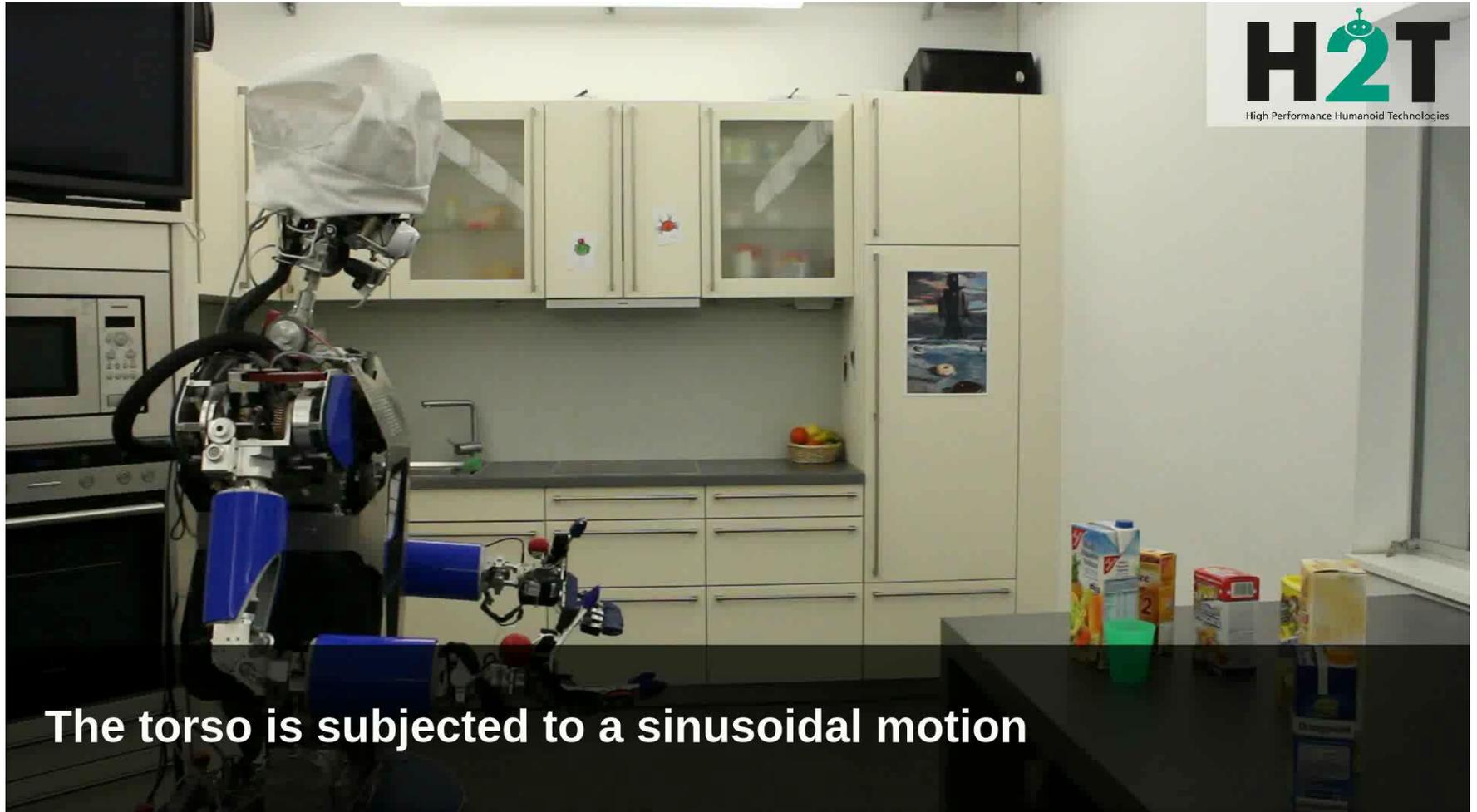
- Mobile Robotik
- Humanoide Robotik
- Industrie-Robotik
- Sicherheitssysteme
- Qualitätskontrolle

## ■ Aufgaben

- Objekterkennung
- Klassifikation
- Detektion
- Bewegungsverfolgung
  - 3D-Sehen
  - Hindernisdetektion



# Motivation I



## Motivation II

- Was ist das Problem?
  - Kamerabewegung
  - Unscharfe Kamerabilder
  - Objekterkennung nicht erfolgreich
  
- Warum ist es interessant?
  - Roboter muss nicht mehr anhalten, um die Umgebung wahrzunehmen.
  - Menschliche Bewegung haben sogar eine höhere Frequenz



# Motivation III

- Welche Lösungsansätze gibt es ?
  - Wie lassen sich Kamerabewegungen reduzieren?
    - **Gaze Stabilization**
  - Wo soll der Roboter überhaupt hinschauen?
    - **Active Vision** (Siehe Robotik-II Vorlesung)
  
- Warum sind die Bilder überhaupt verschwommen?
  - **Sensoren** (Belichtungszeit)
  - **Diese Vorlesung**



# Heute

- Photodioden
- Bildgebende Sensoren
  - CCD-Technologie
  - CMOS-Technologie
  - Farbverarbeitung
- Kamerasysteme
  - Bildaufnahme-Formate
  - Objektive
  - Analog- und Digitalkamera
- Bildrepräsentation

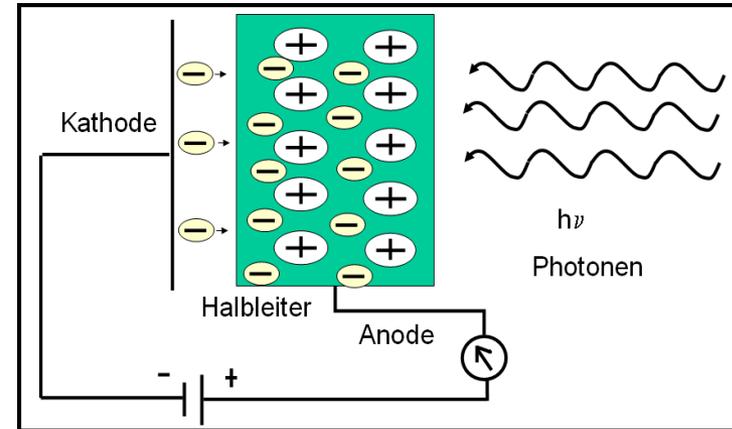
# Photodiode I

## ■ Innerer Photoeffekt

- Photoleitung wird in halbleitenden Festkörpern beobachtet, bei denen Elektronen vom Valenzband durch Photonen in das energetisch höher gelegene Leitungsband gehoben werden, sodass die Leitfähigkeit des Materials unter Beleuchtung zunimmt.
- Dazu muss das Photon eine Energie von mindestens der Bandlücke aufweisen.
- Treffen Photonen auf die Sensorfläche, so werden Ladungsträger erzeugt, vgl. auch Bändermodell.
- Dieser Effekt beschreibt die Funktionsweise sowohl der Photodiode, als auch des CCD-Sensors, als auch des CMOS-Sensors .

# Photodiode II

- Dies führt zu Stromfluss.
- Strom ca. linear zu Lichteinfall, solange keine Sättigung eintritt.



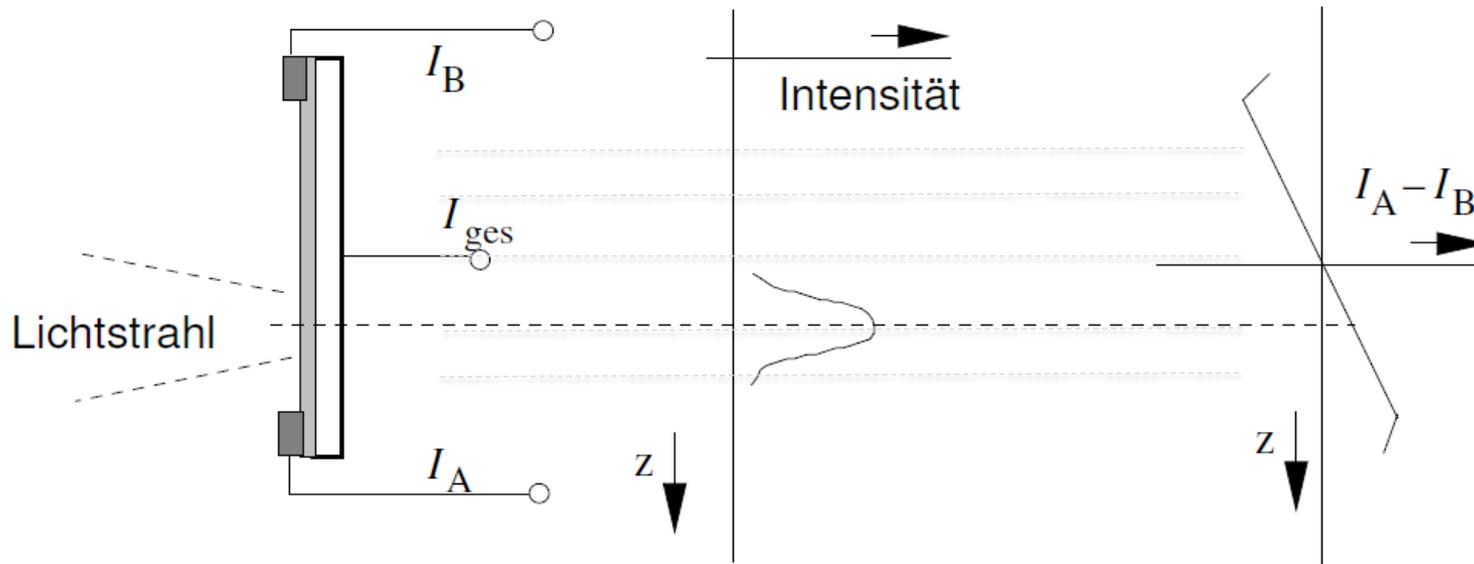
- Material
  - Sichtbares Licht: Silizium
  - Infrarot: Germanium



Quelle: <http://www.hamamatsu.com>

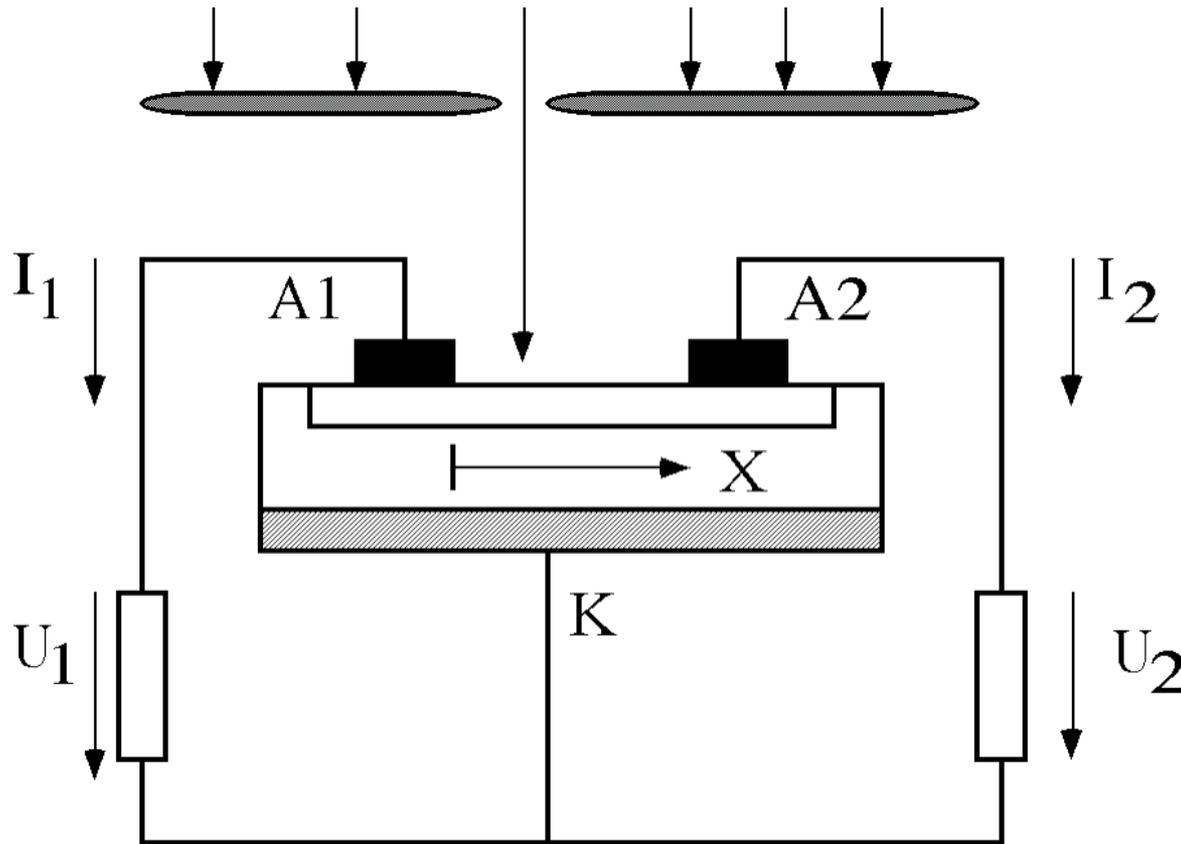
# Photodiode III

- Positionsempfindliche Photodioden (PSDs)
- Auch: Lateraleffekt-Photodiode
- Hohe Positionsauflösung
- Schlechte Helligkeitsauflösung



$$p = \frac{I_A}{I_A - I_B}$$

# Lateraleffektdiode



Aufbau aus einem Halbleiterkristall und zwei Elektroden (A1,A2)

Bestimmung des Auftreffpunktes als Differenz der Ströme  $I_1 - I_2$

# Photodiode III

## ■ Quadranten-Photodiode

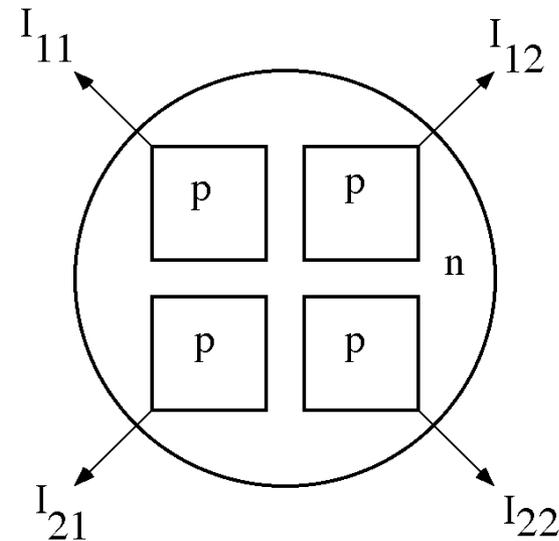
■ Schwerpunktbestimmung des Lichteinfalls:

■ Abweichung in x-Richtung:

$$(I_{11} + I_{21}) - (I_{12} - I_{22})$$

■ Abweichung in y-Richtung:

$$(I_{11} + I_{12}) - (I_{21} + I_{22})$$



# Bildgebende Sensoren

- Verbund vieler Photodiodenelemente in Array- bzw. Matrixform
- Für spezielle, meist industrielle Anwendungen, auch Zeilenform
- Der Typ des Sensors bestimmt sich durch:
  - Art der elektronischen Beschaltung
  - Ausleseverfahren
  - Fertigungstechnik

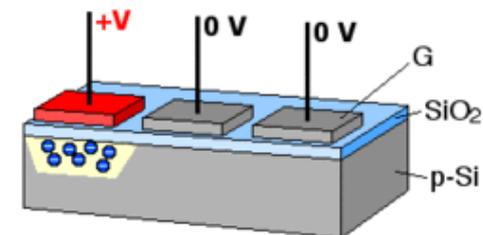
# Chip-Technologien

- CCD (Charge Coupled Devices)
  - Interline-Transfer Sensor
    - Video Sensor
    - Progressive-Scan Sensor
  - Frame-Transfer Sensor
    - Full-Frame Sensor
    - Video Sensor
  
- CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
  
- Selten benutzt
  - CID: Charge Injection Devices
  - SSPD: Self Scanned Photo Diodes
  - CCPD: Charge Coupled Photo Devices

# CCD-Technologie I

## ■ Charge-Coupled-Device (Eimerkettenspeicher)

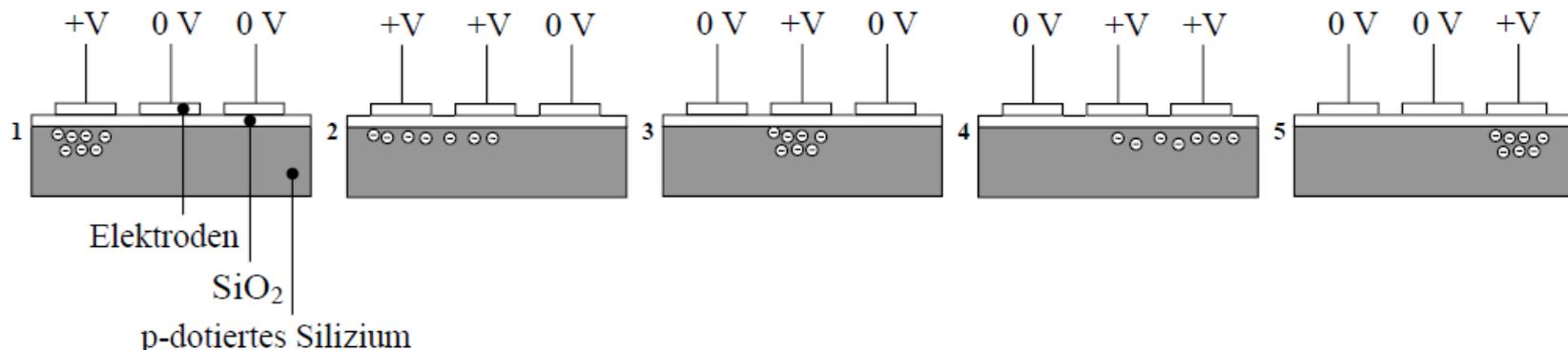
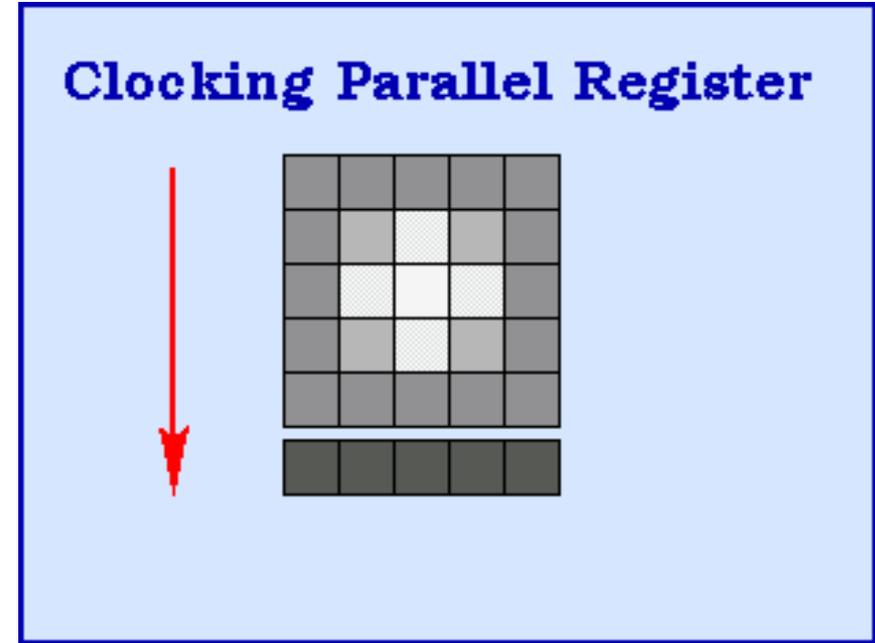
- Ursprünglich als analoger Speicherbaustein entworfen
- Mit lichtempfindlichen Elementen wird daraus eine Kamera
- Prinzip einer Löschkette:  
Ladungsträger, die sich aufgrund des inneren Photoeffektes in einer Potenzialmulde angesammelt haben, können „herausgetaktet werden“



# CCD-Technologie II

## ■ Das Charge-Coupled-Device

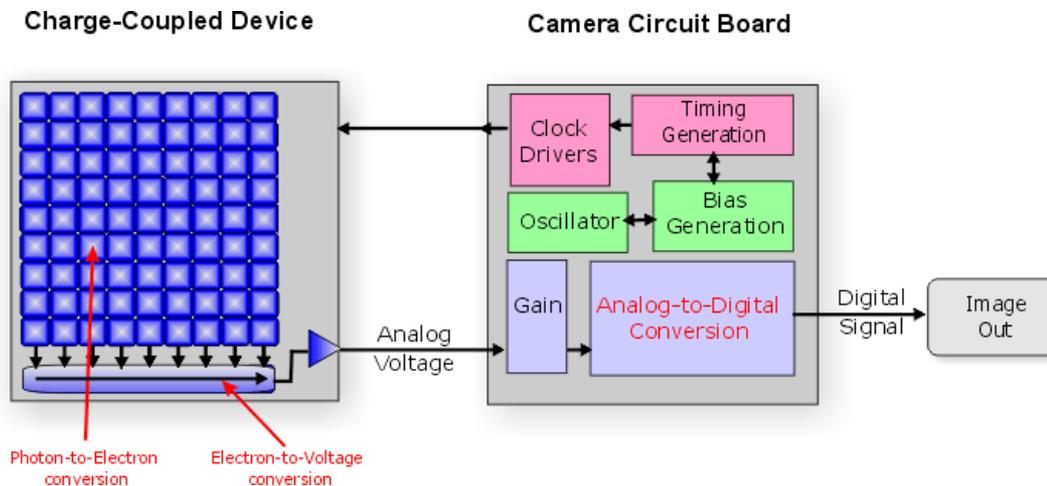
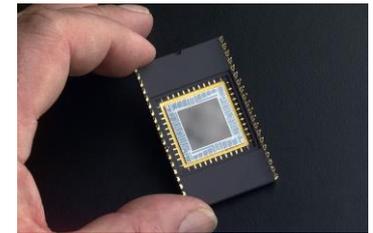
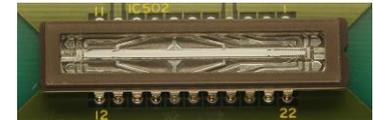
- Sequentielle Schritte 1 bis 5
- In der Auslesephase dürfen keine neuen Ladungen hinzukommen („Smear“-Effekt)
- Ablauf bei 3-Phasen Register:



# CCD-Technologie III

## Bestandteile:

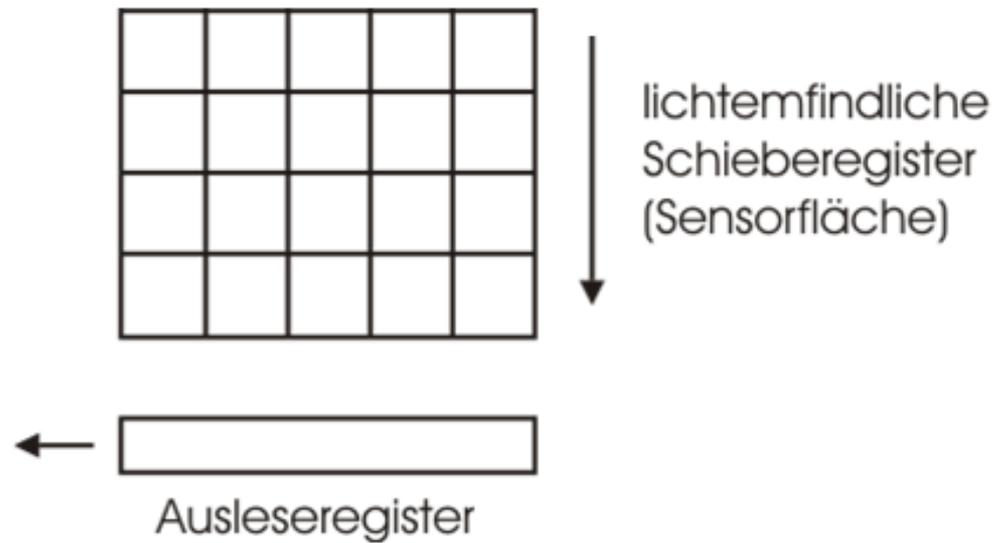
- *Photoelemente*: Ladungsspeicherung in Potentialmulden
- *Ladungstransporter*: Analoges Schieberegister
- *Maske*
  - bestimmt Orte des Lichteinfalls
  - Bestimmt Frequenz des Lichteinfalls
- *Anordnungsgeometrie*



# CCD als Frame-Transfer Sensor

- Belichtungs- und Speicherbereich sind große Blöcke
- Schieberegister selbst sind lichtempfindlich
- Grundeinheit besteht aus 4 Phasenelementen bei Variante Frame-Transfer
  
- Varianten:
  - Full-Frame Sensor
  - Video Sensor

# Full-Frame Sensor I



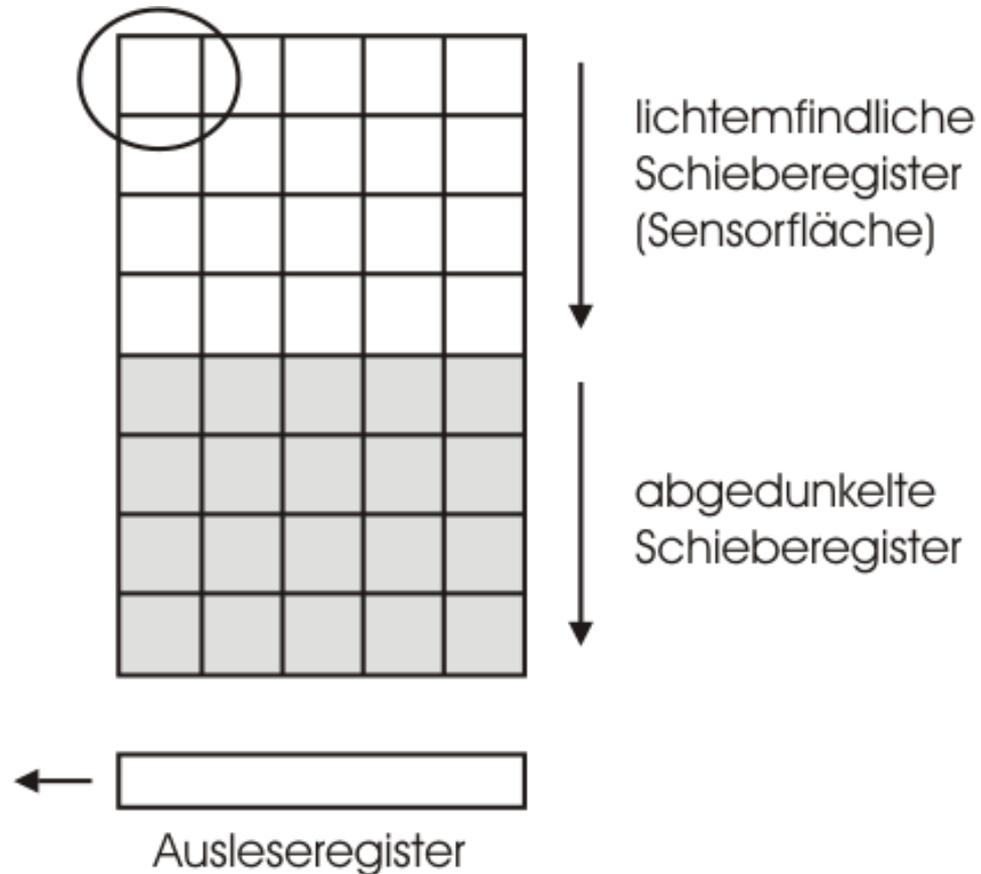
# Full Frame Sensor II

- Einfachste Variante
- Bei einer Bildwiederholrate von 30 Hz ca. 33 ms/Bild. Bei VGA-Auflösung (640x480) ergeben sich ca. 70  $\mu$ s/Zeile.
- Probleme
  - Auslesen sehr langsam
  - Benötigt mechanischen *Shutter* (Sonst werden Zeilen unterschiedlich lang belichtet)
  - *Smearing* durch Durchschieben

# Video Sensor I

Sensorfläche doppelt so groß wie beim Full-Frame Sensor:

- Lichtempfindliche Sensorfläche besitzt die gleiche Größe wie bei Full-Frame Sensor
- Zusätzlich abgedunkelte Schieberegister



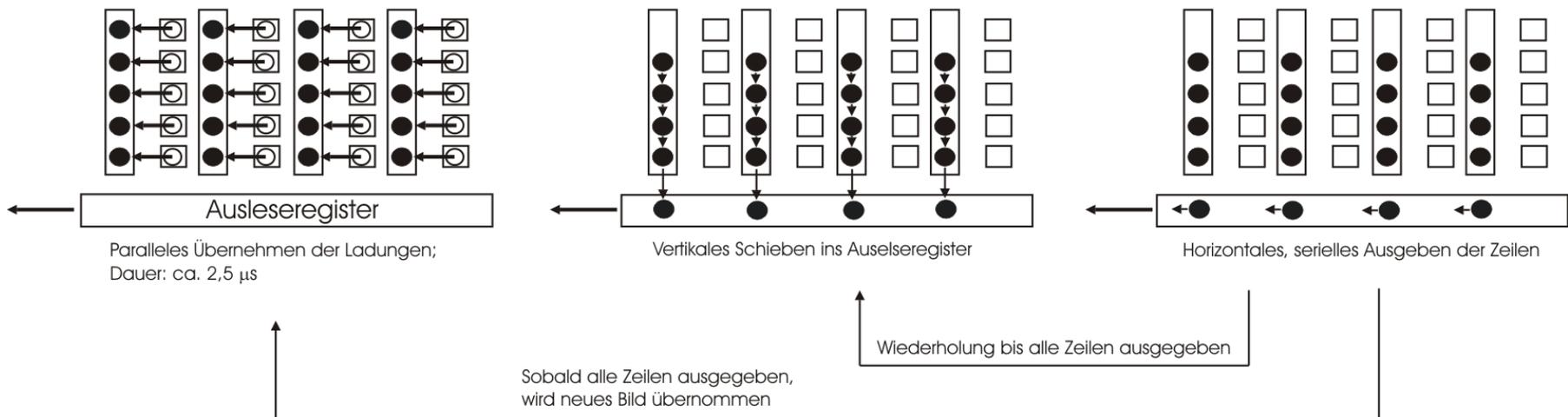
# Video Sensor II

- Zuerst: Verschieben in dunkle Hälfte des CCD
- Dann: Auslesen
- ca. 100 ns pro Zeile  $\Rightarrow$  im Vergleich zu 30 Hz VGA-Sensor  
Beschleunigung des Verschiebens einer Zeile um ca. Faktor 700
  
- Vorteile gegenüber *Full Frame* CCD:
  - Um Größenordnungen schnellere Verschiebung in unbelichteten Teil
  - Dadurch kein mechanischer *Shutter* notwendig
- Nachteil
  - Doppelt so große Sensorfläche im Vergleich zu Full Frame CCD

# CCD als Interline-Transfer Sensor I

## ■ Aufbau des Sensors

- Belichtungs- und Speicherbereich
- Streifenförmige Anordnung
- Parallele Übernahme der Ladung
- Neubelichtung parallel zum Ladungstransport

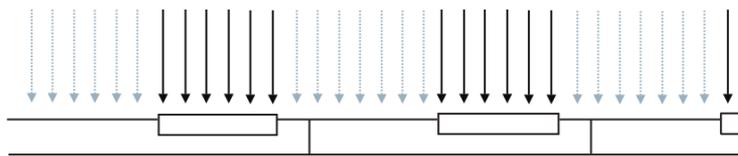
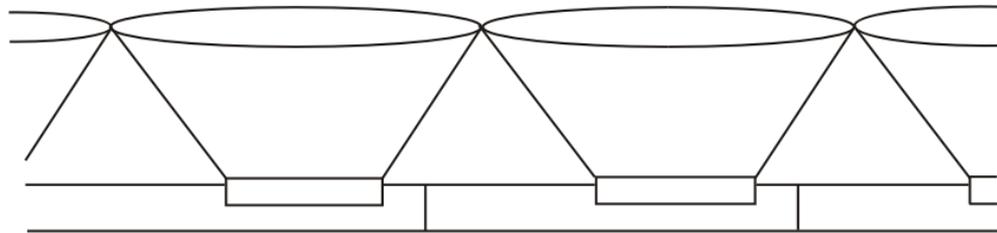


# Interline-Transfer Sensor II

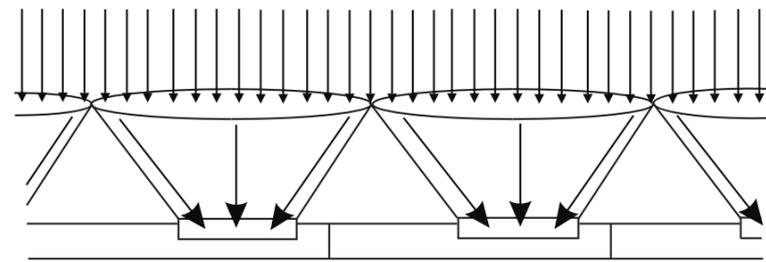
- Ladungen werden mit einem Shift in die seitlichen lichtunempfindlichen Schieberegister verschoben
  
- Vorteile
  - Praktisch beliebig kurze Belichtungszeit möglich
  - Elektronischer Shutter möglich
  
- Nachteile
  - Doppelt so große Sensorfläche im Vergleich zu Full Frame CCD
  - Füllfaktor 50% im Vergleich aufgrund von Bauweise (deswegen Mikrolinsen)
  - Nähe der lichtempfindlichen und lichtunempfindlichen Zellen

# Lens-on-Chip Technik I

- Aktive, lichtempfindliche Sensorfläche macht nur einen kleinen Teil der Fläche eines Sensorelementes aus  
 → hoher Lichtverlust bei Interline-Transfer-Technik
- Abhilfe: Mikrolinsen über jeder Sensorfläche
- Empfindlichkeitssteigerung um Faktor 2



Senzorzellen ohne lens-on-chip

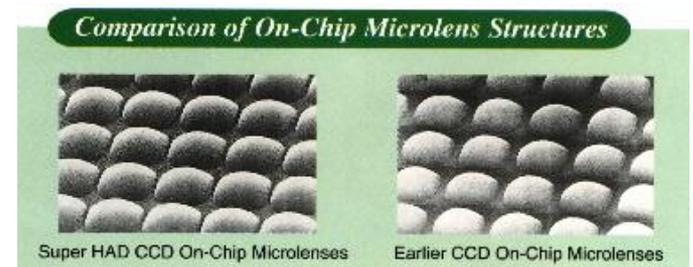
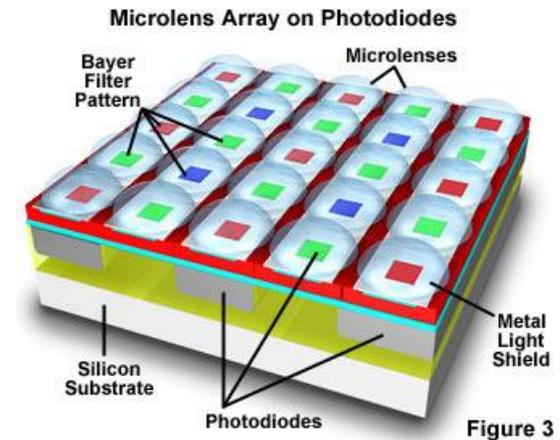


Senzorzellen mit lens-on-chip

# Lens-on-Chip Technik II

## Mikrolinsen

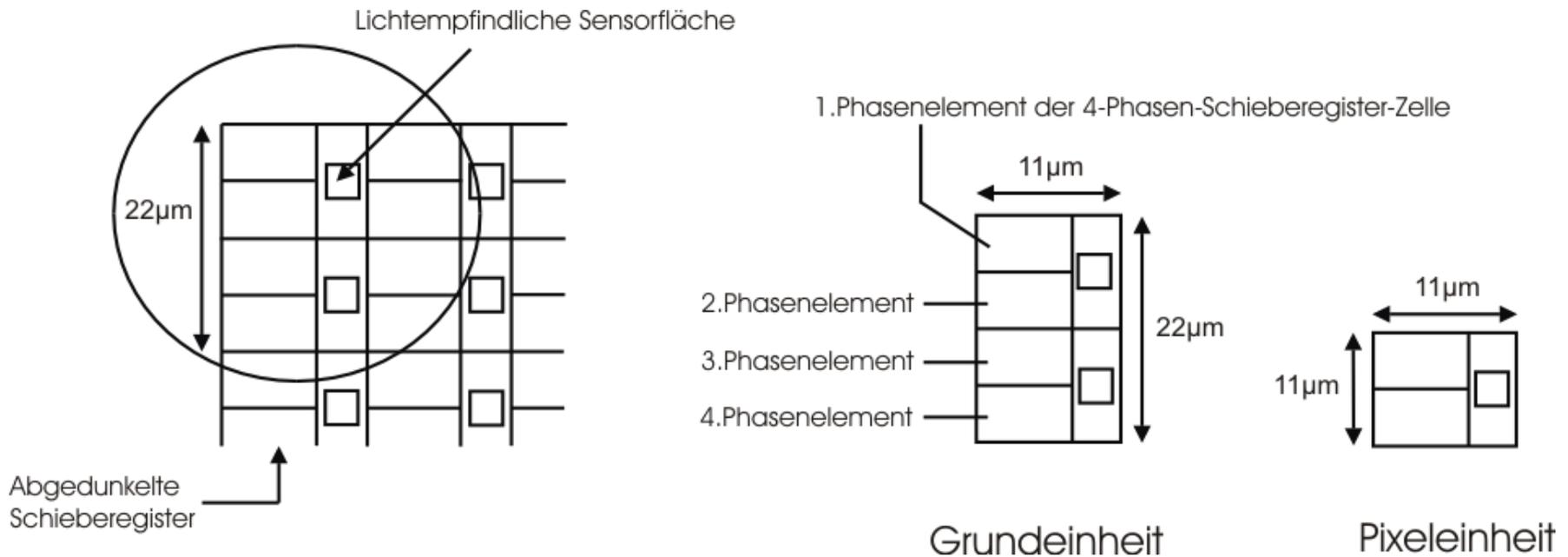
- Bei geringem Füllfaktor: hierdurch wieder hohe Lichtausbeute pro Pixel,
- mittlerweile sehr verbreitet,
- bringen aber auch Abbildungsfehler mit sich (nicht leicht optimal zu fertigen bei Pixelgrößen um  $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ ).



# Interline-Transfer – Video Sensor I

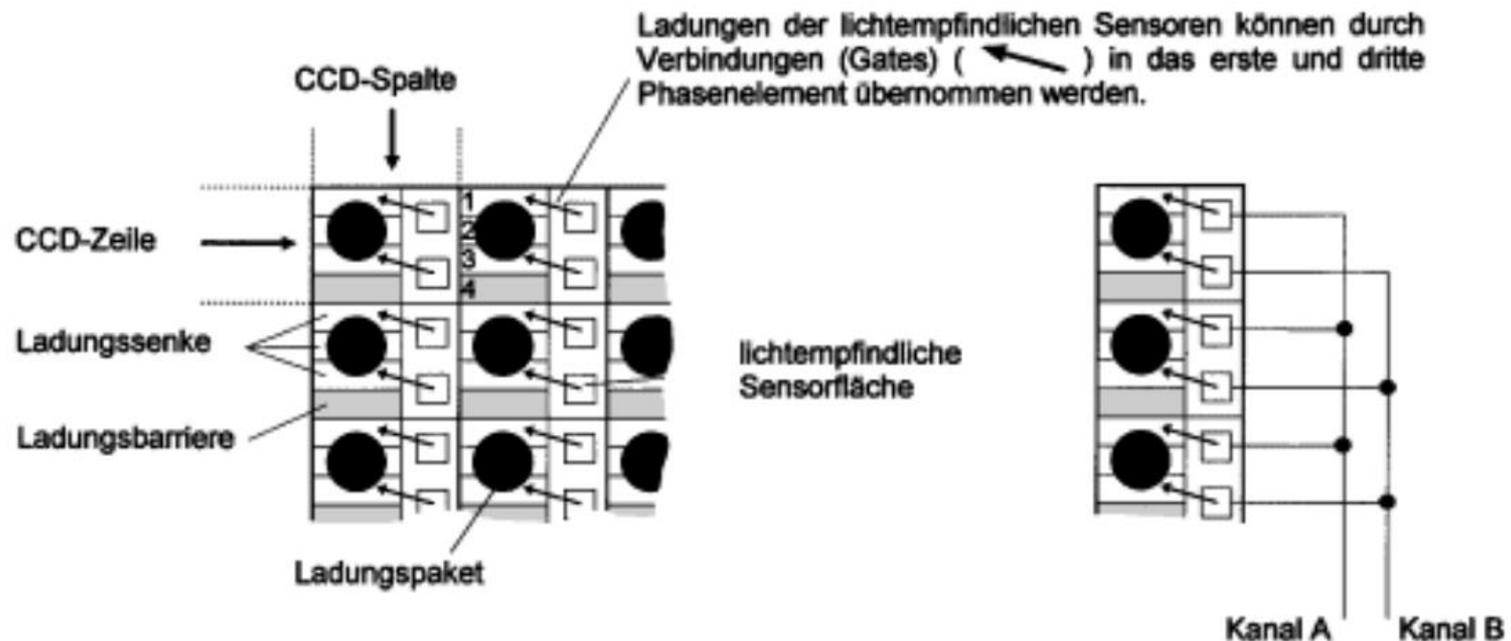
## ■ Aufbau

- 4-Zellen-Schieberegister pro Doppelpixel
- Ladungssenke oder Ladungsbarriere
- „Verschieben“ der Ladung



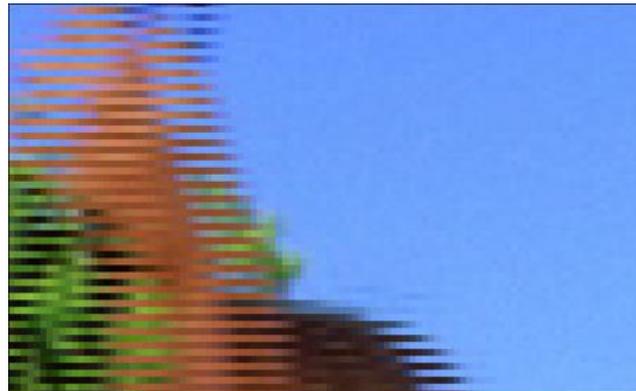
# Interline-Transfer – Video Sensor II

- Betriebsarten des Sensors
  - Field-Integration vs. Frame-Integration
    - Je nach Ansteuerung der Übernahmekanäle
  - Interlaced vs Non-Interlaced
    - Je nach Vorbesetzung der Ladungsbarrieren



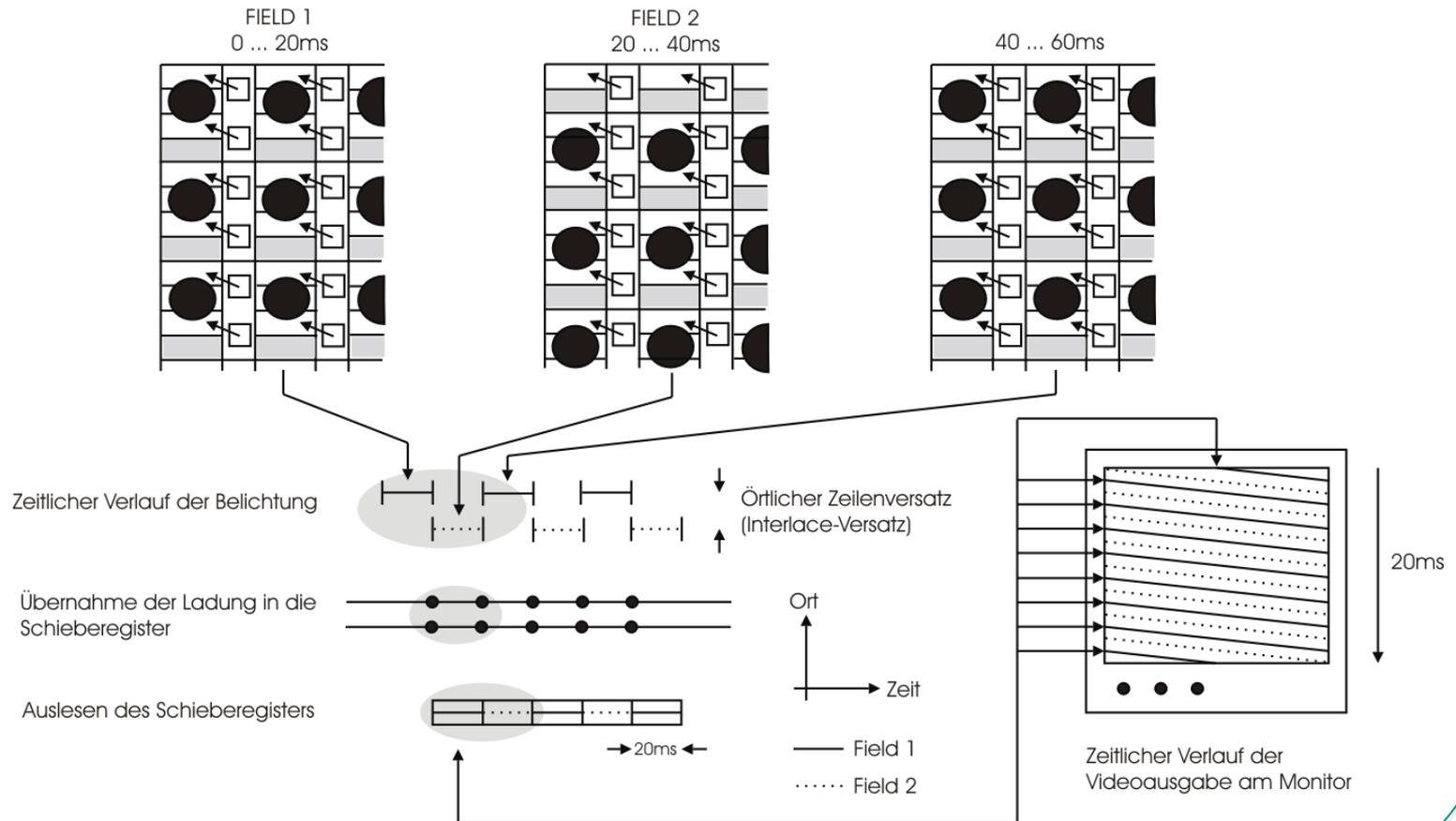
# Interlacing allgemein

- Bei Telefunken von Fritz Schröder entwickelt
- Patentierte im Jahr 1930
- Motivation: Flimmern bei 25 Hz wahrnehmbar
- Bildrate von 50 Hz statt 25 Hz bei gleicher Bandbreite
- Problem: Kammereffekt
  - Bei schnellen Bewegungen
  - Bei Umrechnung auf andere vertikale Auflösung



# Field Integration Interlaced I

## FIELD-Integration INTERLACED



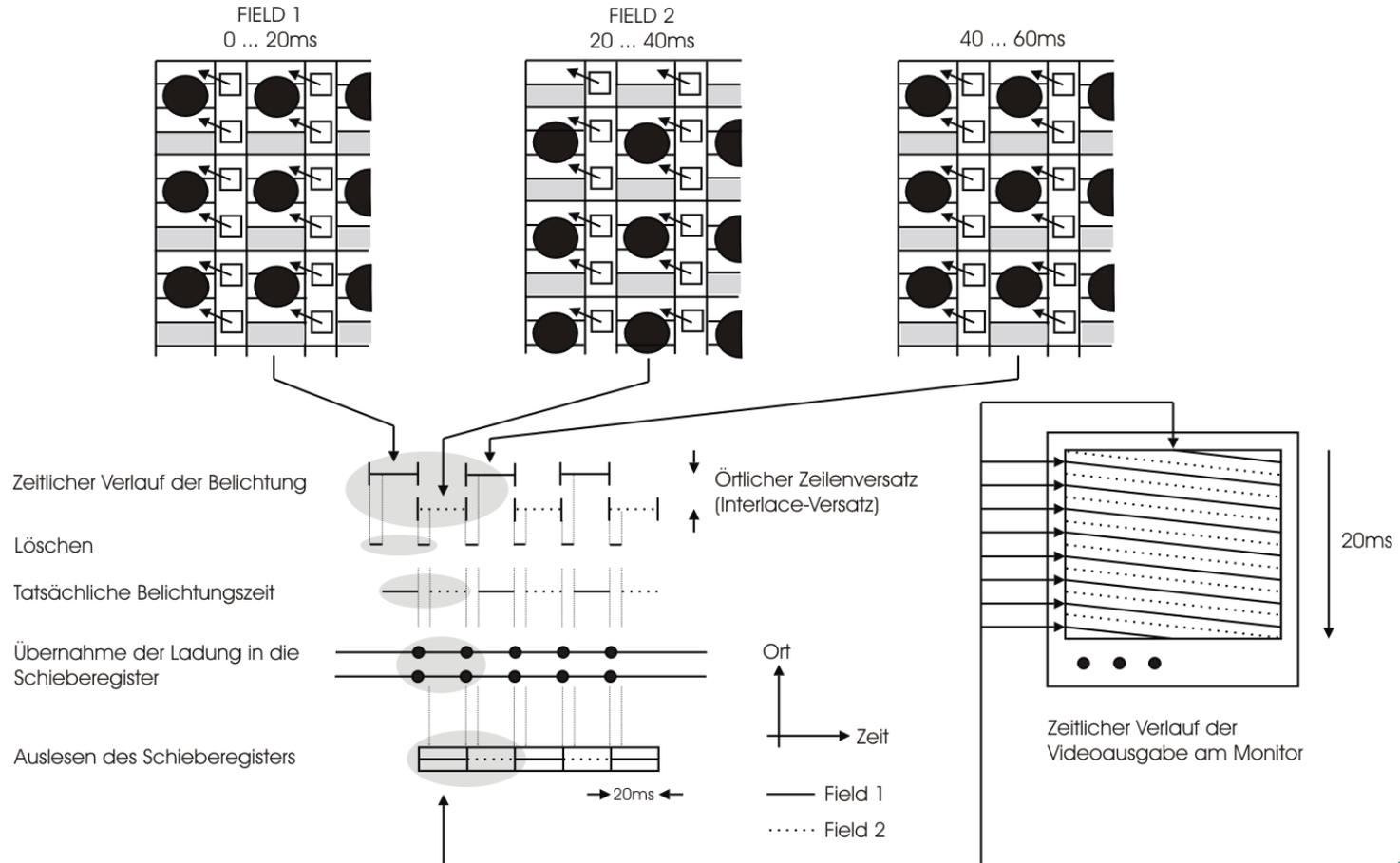
# Field Integration Interlaced – Shutter I

## ■ Elektronischer Shutter:

- Reset der lichtempfindlichen Sensoren durch Schalten der Dioden in Flussrichtung
- → Photostrom fließt ab
- → keine Beeinflussung der Schieberegister

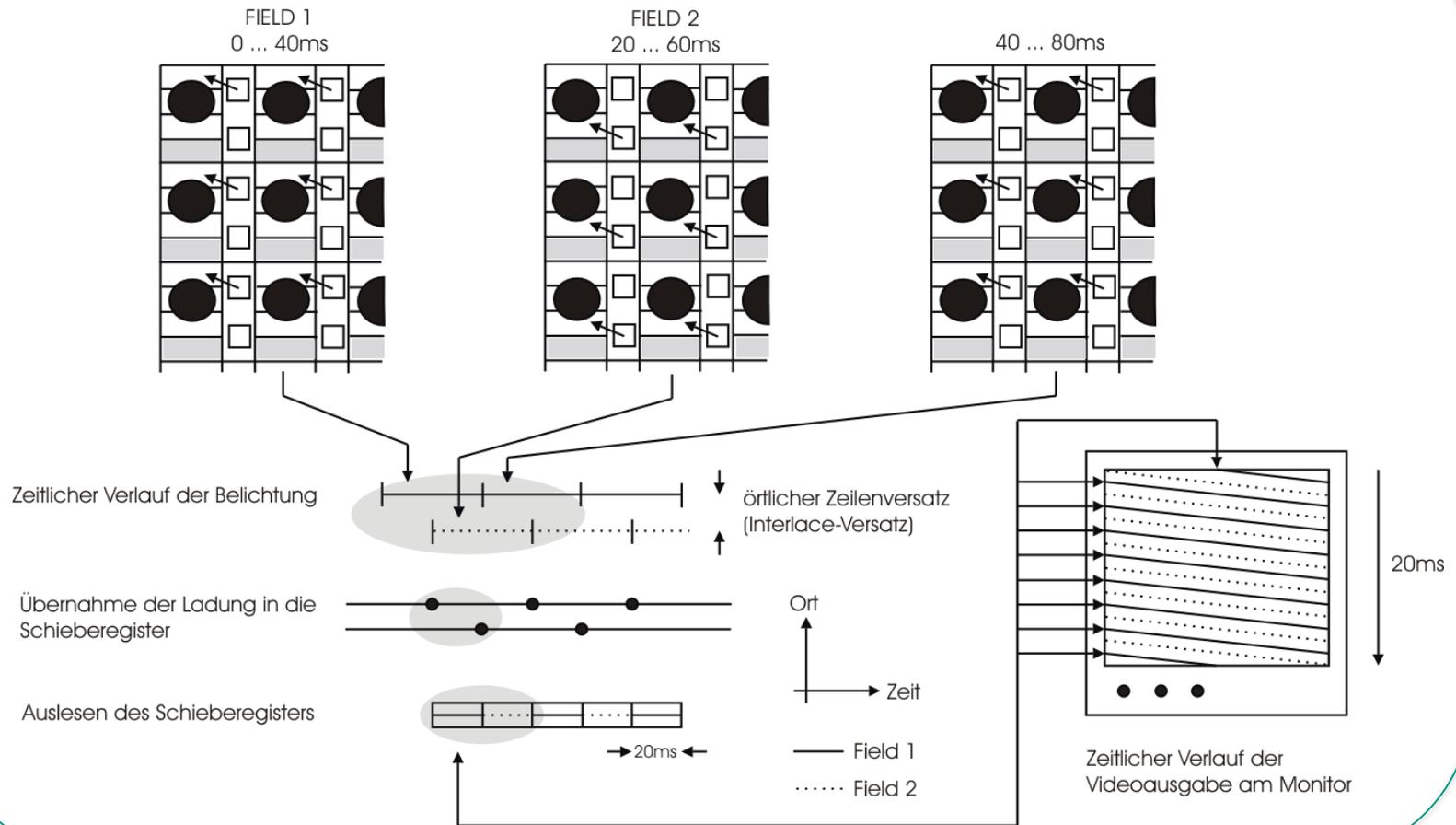
# Field Integration Interlaced-Shutter II

## FIELD-Integration INTERLACED mit elektronischem Shutter



# Frame Integration Interlaced

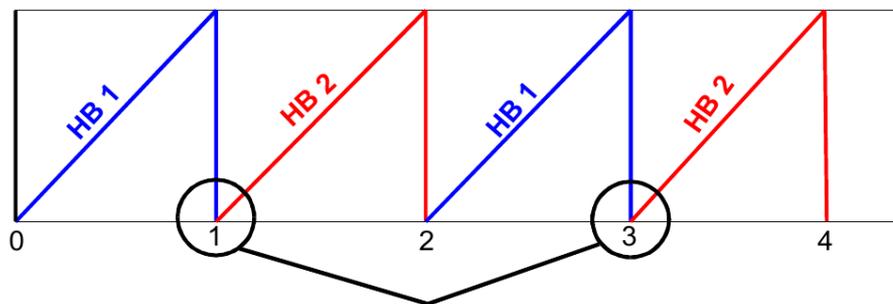
## FRAME Integration INTERLACED



# Betriebsarten Video Sensor: Übersicht

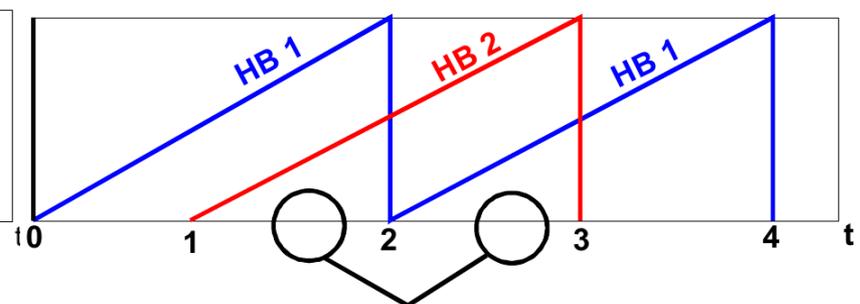
Betriebsarten	Belichtungszeit	Zeitliche Folge der Belichtung	Örtliche Position der Halbbilder
FIELD-Integration Interlaced	20 ms	nacheinander	versetzt
FIELD-Integration Non-Interlaced	20 ms	nacheinander	gleich
FRAME-Integration Interlaced	40 ms	überlappend	versetzt

FIELD-Integration



kein Überlappungsbereich

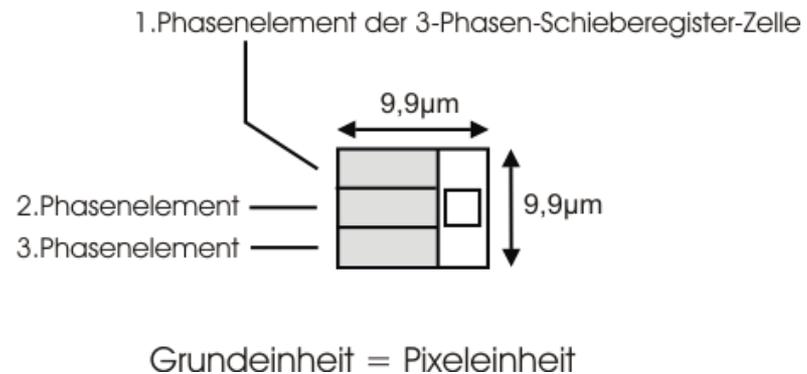
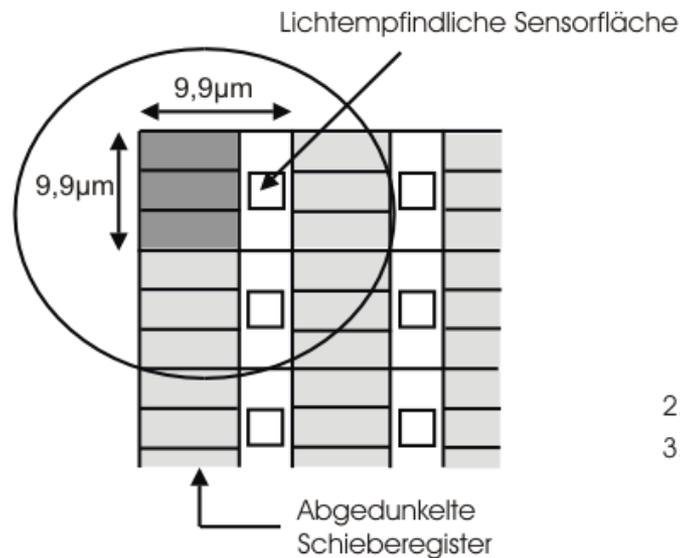
FRAME-Integration



Überlappungsbereich

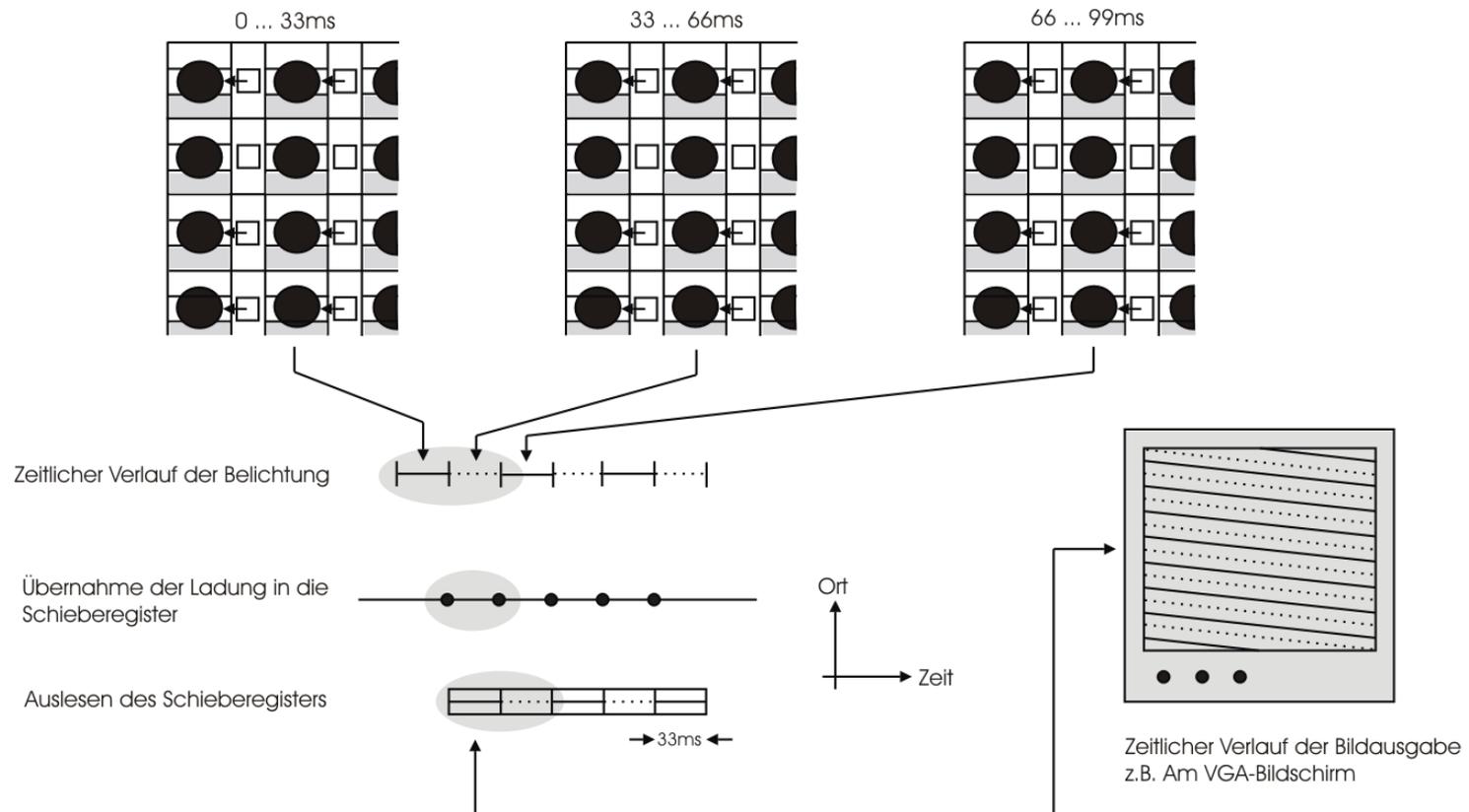
# Interline-Transfer - Progressive-Scan I

- Volle Bildauflösung wird genutzt
- Keine Halbbildauflösung
- Grundeinheit besteht aus 3 Phasenelementen



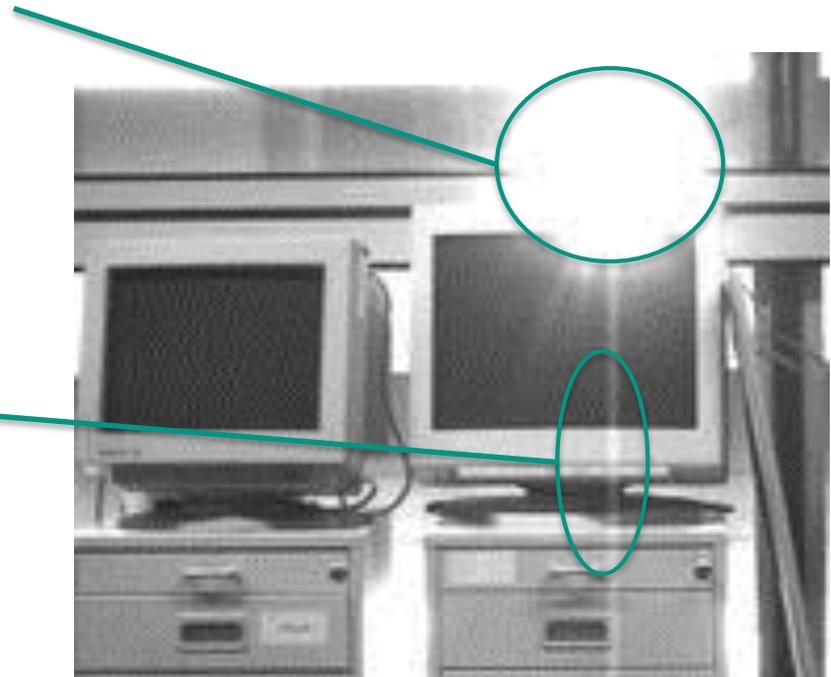
# Interline-Transfer - Progressive-Scan II

## PROGRESSIVE SCAN Interline



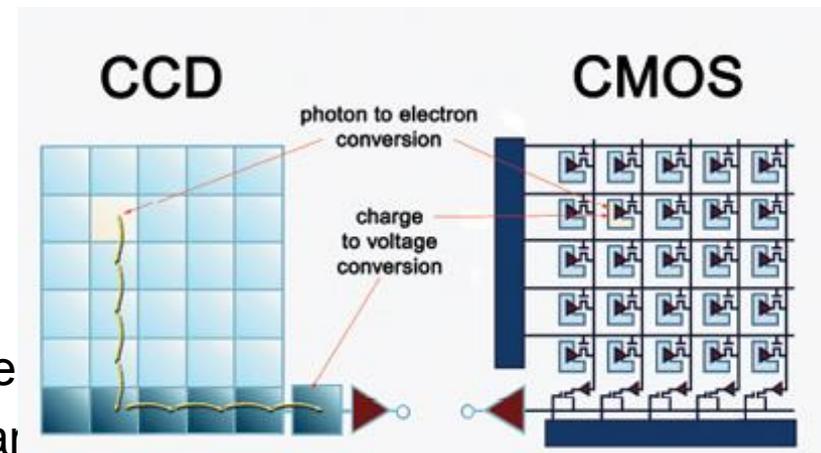
# Fehlerquellen bei CCD-Chips

- Blooming-Effekt
  - Aufblühen benachbarter Bezirke
  - Tritt auf bei zu starker Radianz
  - Überschüssige Ladung wird an Nachbarzellen abgegeben
- Smear-Effekt
  - Verschmieren der Ladung beim Transport



# CMOS-Technologie I

- CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor
- Verwendet Photodioden (ebenso wie CCD)
- Unterschied zu CCD:
  - CMOS-Sensor integriert in jedes Pixel eine eigene Ladungs-Spannungs-Konvertierung
  - Jedes Pixel ist frei adressierbar
- Vorteile:
  - „*Windowing*“ einfach realisierbar (beliebig)
  - Geringerer Stromverbrauch, kleine Kamera
- Nachteil:
  - (Viel) kleinerer Füllfaktor



# CMOS-Technologie II

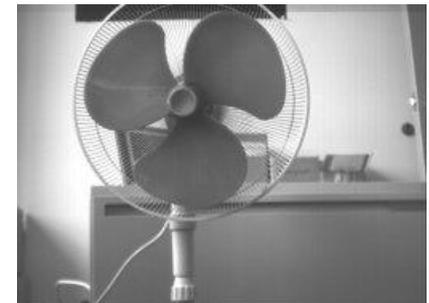
## ■ Rolling Shutter

- Sensor wird pixelweise Zeile für Zeile ausgelesen mit entsprechender Verzögerung
- Jedes Pixel erhält gleiche Belichtungszeit, aber
- Belichtungen erfolgen zeitlich verschoben
- Bewegte Szenen erscheinen hierdurch verzerrt



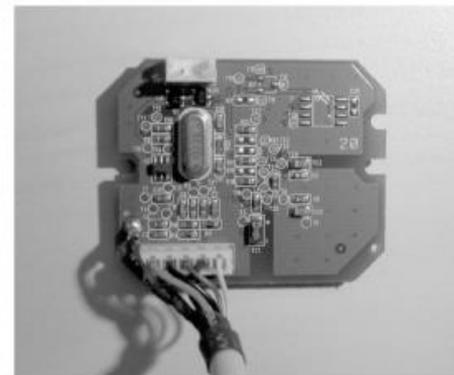
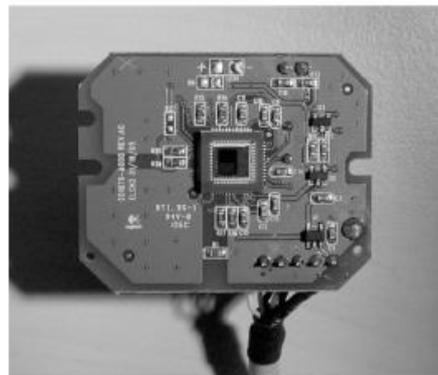
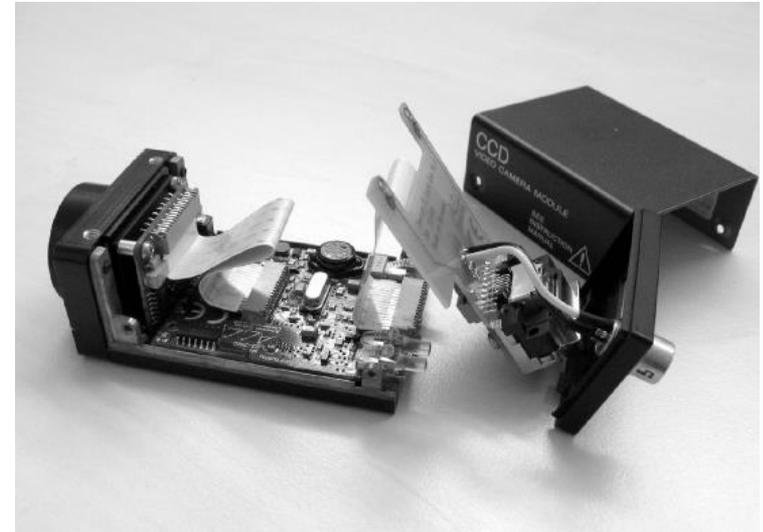
## ■ Global Shutter

- Zusätzlicher FET-Transistor an jedem Pixel
- Beginn/Ende der Integrationszeit kann für alle Pixel simultan angesteuert werden



# CMOS-Technologie III

- Zwei Beispiele, CCD vs. CMOS
- Hohe Integration gut erkennbar: die CCD-Kamera besteht aus drei dichtbestückten Platinen, die CMOS-Kamera fast nur aus dem CMOS-Chip.



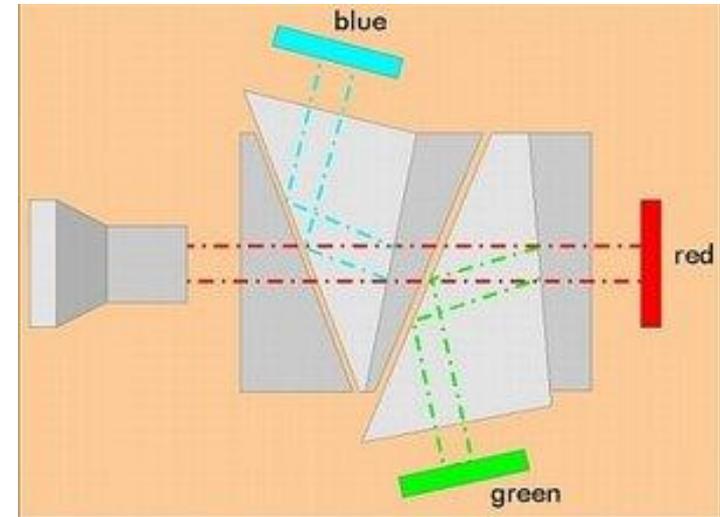
# Vergleich CCD - CMOS

Eigenschaft	CCD	CMOS
Windowing / ROI	nur zeilenweise	beliebig
Dynamikumfang	hoch	mittel
Stromverbrauch	mittel	gering - mittel
Störungen durch Blooming	ja	nein
Lichtempfindliche Fläche	mittel - hoch	mittel
Framerate	mittel	hoch
Signal am Pixelausgang	Ladung	Analogspannung
Signal am Sensorausgang	Analogspannung	Digitalsignal

# Farbverarbeitung I

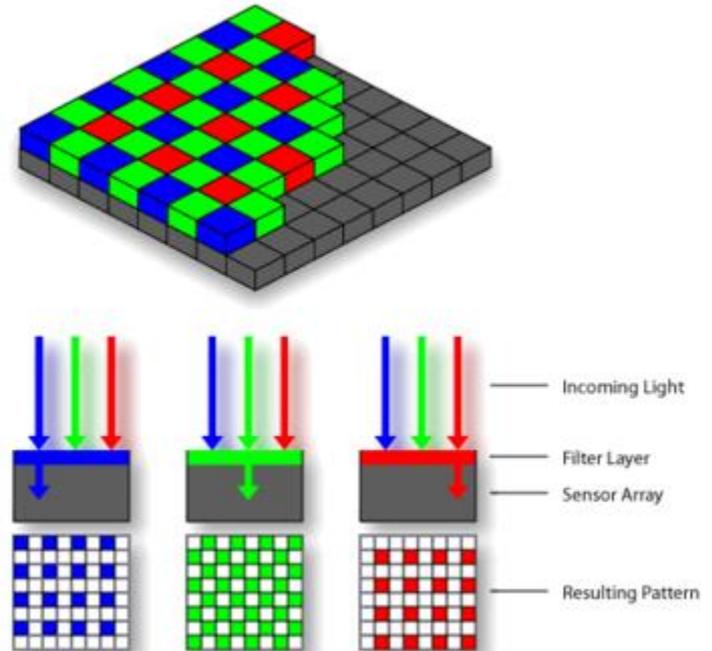
## ■ 3-Chip-Methode:

- Prisma trennt Farbinformation auf 3 Chipflächen
- Vorteile:  
hohe Auflösung,  
hohe Schärfe
- Nachteile:  
sehr teuer, da Prisma und  
3 Chips; hoher  
Justageaufwand



# Farbverarbeitung II

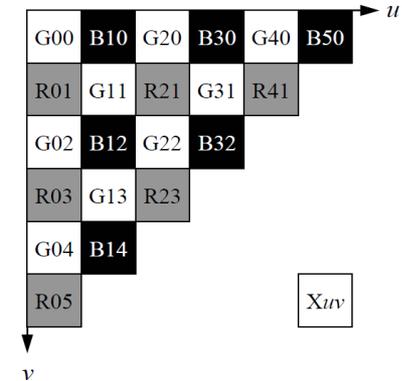
- 1-Chip-Methode mit sog. „Bayer-Pattern“
  - RGB-Muster auf Chipfläche
  - Filtermaske sortiert nach Farbe (Wellenlänge)
  - Vorteile: geringer Platzbedarf, kostengünstig, spart Bandbreite
  - Nachteile: geringere Bildauflösung, größere Unschärfe, geringe Lichtausbeute



# Farbverarbeitung III

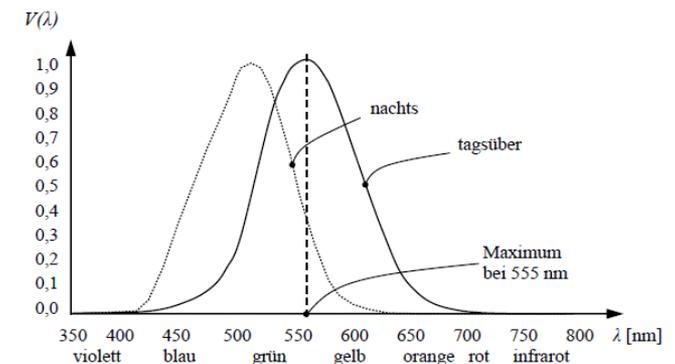
## Details zum „Bayer-Pattern“

- Rückrechnung nach RGB mittels
  - Bilineare Interpolation (vgl. Beispiel)
  - Bikubische Interpolation
  - ...
- Grünpixel doppelt aufgrund der menschl. Hellempfindlichkeitskurve
- Faustregel für Auflösungsverlust gegenüber 3-Chip-Kamera: ca. Faktor 1,4 geringer



I. Berechnung der *RGB*-Werte für Rot-Pixel (Bsp.:  $R_{21}$ ):

$$R_{R21} = R_{21}, \quad G_{R21} = \frac{G_{20} + G_{11} + G_{31} + G_{22}}{4}, \quad B_{R21} = \frac{B_{10} + B_{30} + B_{12} + B_{32}}{4} \quad (1.29)$$



# Bildaufnehmer-Formate

## ■ Bild-Sensor-Format

- Auch bekannt als „optisches Format“ oder „Sensor-Größe“; bezieht sich auf Form und Größe des Bild-Sensors
- Es existieren zwei verschiedene Formatsysteme:
  - Zoll Format
  - APS Format
- Zoll Format:
  - Entstand in den fünfziger Jahren und bezog sich auf Röhrentechnik (Durchmesser eines Vidiconschlauchs bzw. Fernrohröhre).
  - Ein Vidiconschlauch mit Außendurchmesser von 1“ besaß ein recht-eckiges, lichtempfindliches Fenster mit einer Diagonalen von 16mm.
- APS Format:
  - Folgt dem “Advanced Photo System”. Wenn Bild-Sensoren das Format  $4/3$ “ übersteigen, wird der APS Formatstandard verwendet.

# Bildaufnehmer-Formate II

## Zoll-Sensor-Formate

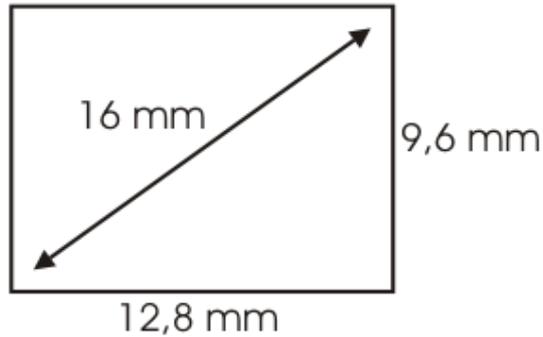
Sensor-Format	Diagonale (Millimeter)	Breite (Millimeter)	Höhe (Millimeter)	Repräsentativ-Sensor
1/3"	6.00	4.80	3.60	Mikron MT9M131
1/2"	8.00	6.40	4.80	Kodak KAF0400
1/1.8"	8.93	7.18	5.32	Sony ICX452
2/3"	11.0	8.80	6.60	Sony ICX285
1"	16.0	12.80	9.60	Kodak KAI2000
4/3"	21.6	17.3	13.0	Kodak KAI4000

## APS Sensor-Formate

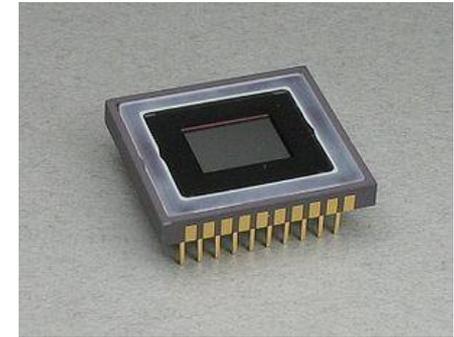
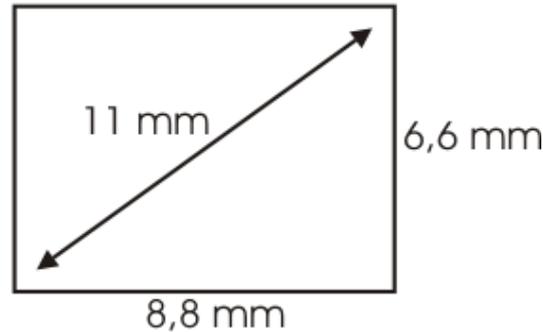
Sensor-Format	Diagonale (Millimeter)	Breite (Millimeter)	Höhe (Millimeter)	Repräsentativ-Sensor
APS-C	26.7-28.4	22.2-23.7	14.8-15.6	Nikon DX
APS-H	33.5	27.9	18.6	APS-H
Full-frame/Nikon FX/APS-F	43.2-43.3	36	23.9-24	Nikon FX
Foveon X3	24.9	20.7	13.8	Foveon X3

# Bildaufnehmer-Formate III

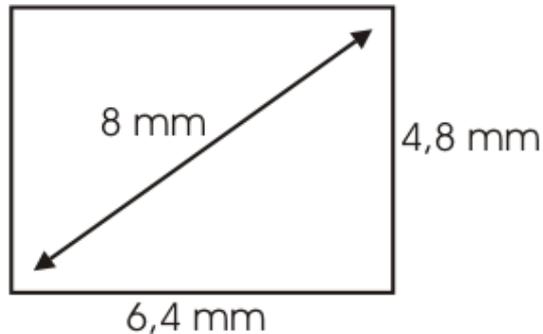
1"



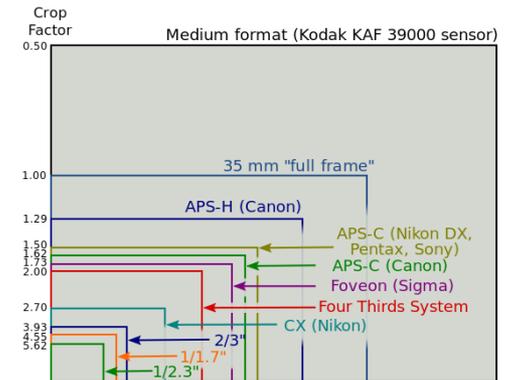
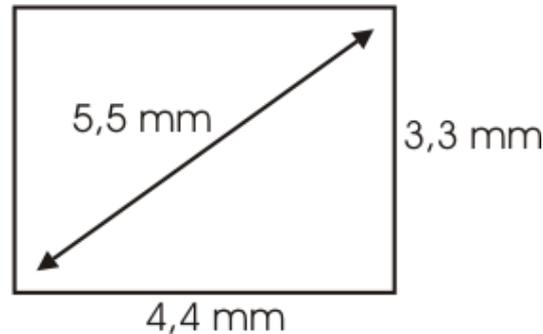
2/3"



1/2"



1/3"



kein einfacher rechnerischer Zusammenhang → Tabelle.

# Objektive I

- C- / CS-Mount
  - Normiertes Objektivanschlussgewinde
    - Durchmesser: 1 Zoll
    - Gewindesteigung: 1/32 Zoll
- Abstand zwischen Objektivauflagefläche und Bildebene
  - C-Mount: 17,5 mm
  - CS-Mount: 12,5 mm



## Objektive II

- Objektive haben in der Regel einstellbaren Fokus (Scharfstellung für eine bestimmte Entfernung)
- Brennweite
  - entweder feste Brennweite,
  - oder variable Brennweite (Zoom, meist manuell)
- Blende
  - Blendenzahl beschreibt relative Öffnung der Blende
  - Preiswerte Objektive besitzen u. U. keine Blende

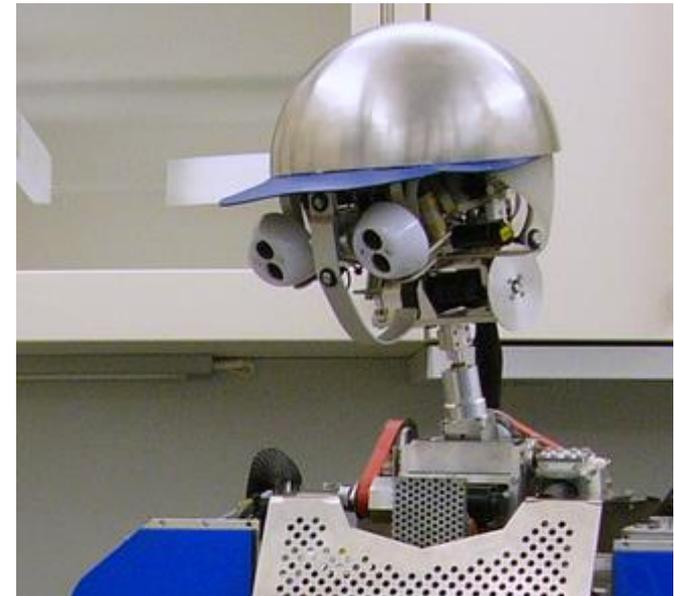
# Objektive III

## ■ Beispiel

	Manufacturer	Pentax
	Type designation	TV Lens H1214-M
	Specification	Manually operated, high resolution lens with lock screws for 2-Megapixel-C- and CS-mount cameras
	Connection (thread), format	C-mount, 1/2"
	Focal distance	12 mm
	Iris range	F 1.4–16
	Aperture adjustment	Manually operated, fixable
	Focal distance adjustment	Manually operated, fixable
	Angle of view, horizontally	ca. 29.8 °
	Minimal object distance MOD	0.25 m

# Mini-Objektive

- M12-Gewinde
  - Keine Blende
  - Fester Fokus
  - Feste Brennweite
  - Sehr klein
  - Sehr günstig
- 
- Karlsruhe Humanoid Head/ARMAR-III realisiert foveales und peripheres Sehen durch Verwendung von Objektiven mit unterschiedlicher Brennweite



# Licht / Beleuchtung

- In der industriellen Bildverarbeitung spielt die Beleuchtung eine sehr große Rolle
  - An Aufgabe angepasstes Beleuchtungskonzept
  - Definierte Bedingungen (Licht)
- In kognitiven Systemen stellen Veränderungen der Lichtverhältnisse oftmals ein großes Problem dar
  
- Kamera bietet (sowohl manuell als auch automatisch)
  - Gain (Automatisch: Automatic Gain Control (AGC))
  - Shutter
  - White Balance
  - ...

# Analogkameras

- Ausschließlich CCD, kein CMOS
- Spannungen am Sensorausgang des CCD-Chips werden seriell übertragen
- Anschluss über *Frame-Grabber*-Karte an den PC
- *Frame-Grabber* führt A/D-Wandlung durch

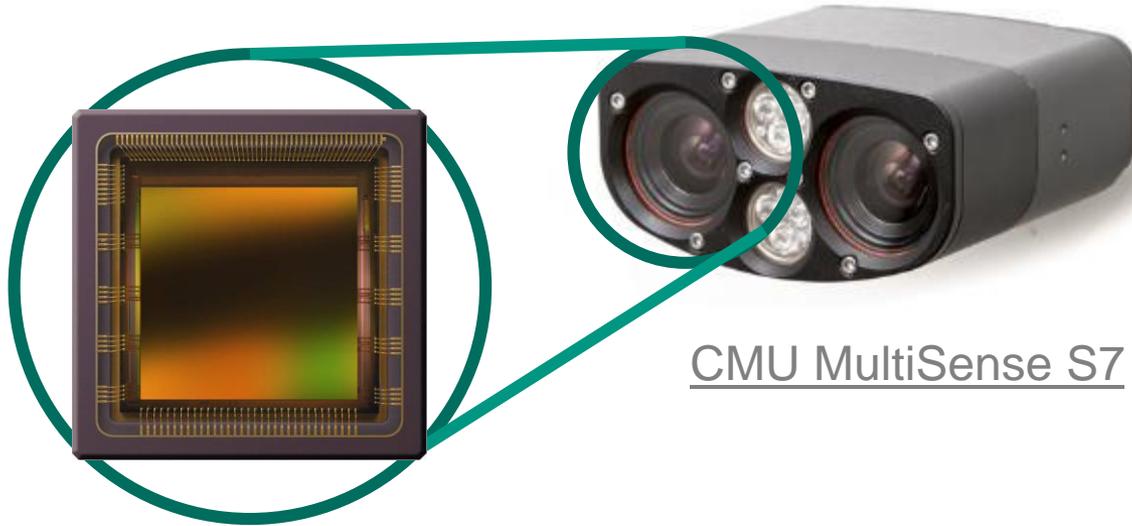
# Digitalkameras I

- Anschluss erfolgt über:
  - Firewire:
    - IEEE1394a: 400 Mbit / s (320 Mbit / s nutzbar)
    - IEEE1394b: 800 Mbit / s (640 Mbit / s nutzbar)
  - USB 2.0: 480 Mbit / s (430 Mbit / s nutzbar)
  - USB 3.0: 5000 Mbit / s
  - Camera Link: bis zu 5,44 Gbit / s
  - Gigabit Ethernet (GigE): 1000 Mbit / s (720 Mbit / s nutzbar)
  
- Digitalkameras liefern direkt digitalisierte Bilddaten
  - Format je nach Kamera und Modus unterschiedlich
  - Bei S/W-Kameras meist 8 bit Graustufen
  - Bei Farbkameras entweder als Bayer-Pattern oder meist bereits konvertiert als RGB24, YUV422, etc.

# Digitalkameras II

- Kameras unterscheiden sich durch:
  - Bildqualität (Qualität CCD-Chip (bzw. CMOS-Chip), aber auch grundlegend: Auswahl Linse/Objektiv)
  - Graustufen- oder Farbkamera
  - Auflösung (z.B. 640×480, 1024×768, 2048 x 1088)
  - Bei Farbkameras: Welche Farbkodierungen sind verfügbar? (8bit, 16bit, 24bit)
  - Wichtig je nach Anwendung:  
Welche maximale Framerate ist bei welchem Bildformat noch verfügbar?  
(z.B. 15/30/60/120/200 Hz)

# Kamerabeispiele



CMU MultiSense S7



Karlsruhe Humanoid Head



PointGrey Flea3 USB3



roboception (Prototyp)

# Bildrepräsentation

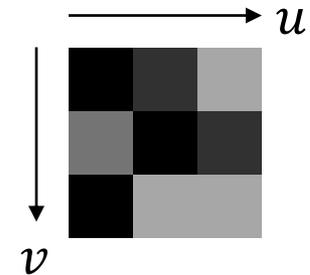
- Bilder müssen im Computer/Roboter repräsentiert werden
- Ein Bild ist ein 2D Gitter von diskreten Punkten (**Pixel**)
- **Bildkoordinaten** (hier):
  - $u$  (horizontal)
  - $v$  (vertikal)
  - Ursprung ist oben links
  - Einheiten: Pixel
- Die **Farbe** eines Bildpunktes kann auf unterschiedliche Weise repräsentiert werden
- **Graustufenbilder**: Für jeden Pixel wird ein Helligkeitswert abgelegt
  - Normalerweise ein Byte pro Pixel, i.A. Werte in  $[0, 255]$

# Bildrepräsentation II

## Monochrombild: Diskrete Funktion

$$Img: [0 \cdots n - 1] \times [0 \cdots m - 1] \rightarrow [0 \cdots q]$$

$$(u, v) \mapsto Img(u, v)$$



0 für schwarz  
255 für Weiß

Üblich:

$$q = 255$$

$$n = 640, \quad m = 480 \text{ (VGA)}$$

oder  $n = 768, \quad m = 576 \text{ (PAL)}$

$$n = 1280, \quad m = 960 \text{ (QVGA)}$$

# Bildrepräsentation III

## Farbbild:

- Verschiedene Farbmodelle für unterschiedliche Anwendungen
- Klassifikation nach erreichbarem Farbraum

## Beispiele:

- **RGB**-Modell (**R**ot-**G**rün-**B**lau-Modell): speziell für Monitore (Phosphor-Kristalle)

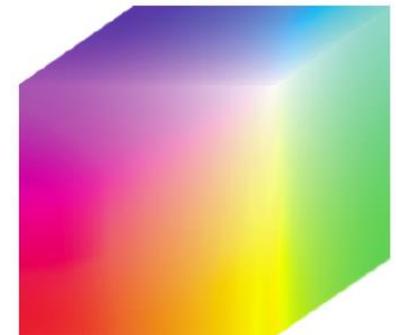
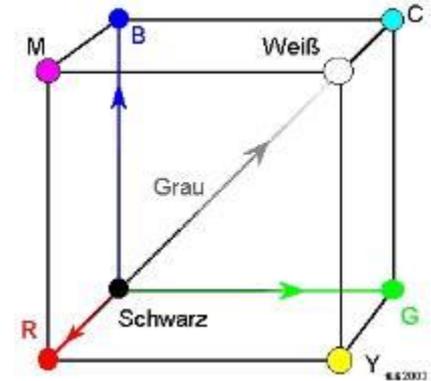
$$\text{Img}(u, v) = (r, g, b)^T \in \mathbb{R}^3$$

- HSI (Hue, Saturation, Intensity): geeignet für Farbsegmentierung
- CIE: physikalisch (Wellenlänge)
- CMYK-Modell (Cyan, Magenta, Yellow, Schwarzanteil „Key“): Farbdruker (subtraktive Farbmischung)
- YIQ: Analoges Fernsehermodell

# Bildrepräsentation IV

## RGB Farbraum

- Additive Farbmischung
- Drei Farbwerte: *Rot*, *Grün*, *Blau*
- *RGB24*
  - Ein Pixel wird durch 3 Bytes repräsentiert (rot, grün, blau)
  - Jedes Byte entspricht 8 Bits  
→ 256 Abstufungen für jeden Farbwert
  - $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 16,8$  Mio. Farben darstellbar



24-Bit RGB Farbwürfel

$$Img: [0 \dots n-1] \times [0 \dots m-1] \rightarrow [0 \dots R] \times [0 \dots G] \times [0 \dots B]$$

$$(u, v) \mapsto Img(u, v) = (r, g, b)^T$$

# Bildrepräsentation V

## HSI (HSV) Farbraum

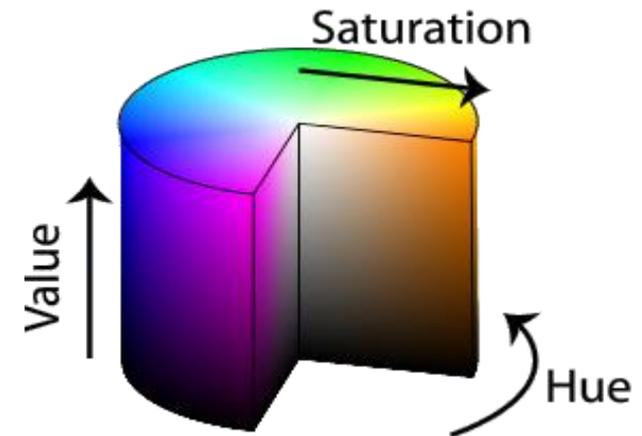
- *Hue* (Farbnuance), *Saturation* (Sättigung), *Intensity/Value* (Helligkeit)
- Kodiert der Farbinformation getrennt von Helligkeit und Sättigung der Farbe  
⇒ unempfindlich gegen Beleuchtungsänderungen
- Umrechnung von RGB nach HSI
  - H undefiniert, falls  $R = G = B$
  - S undefiniert, falls  $R = G = B = 0$

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{falls } B < G \\ 360 - \theta, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\theta = \arccos \frac{2R - G - B}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}}$$

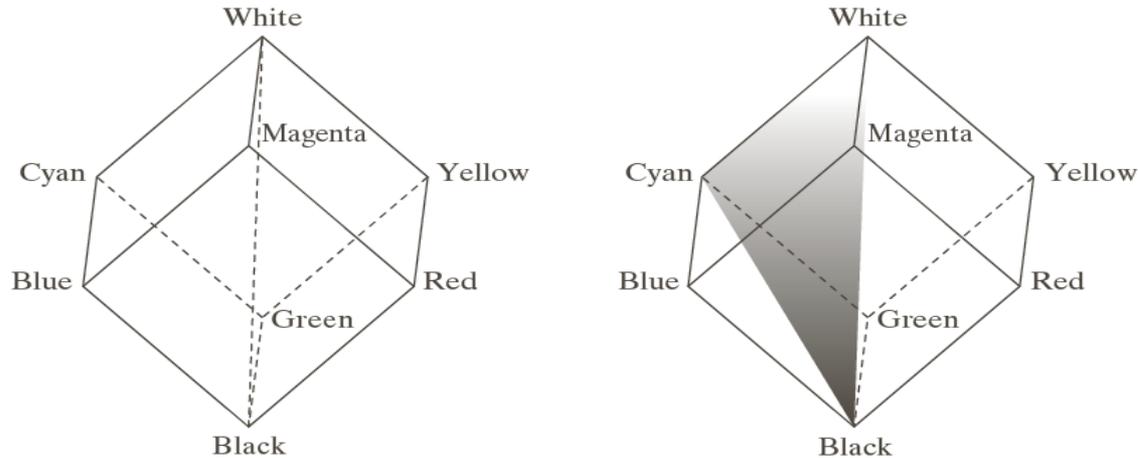
$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B)$$

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$



# Bildrepräsentation V

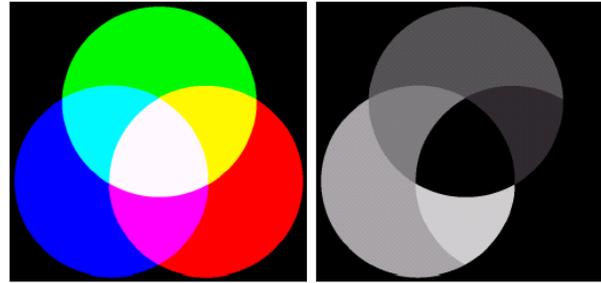
## Wie bestimmt man HSI Werte in einem RGB Würfel?



- Im RGB Format entspricht die **Helligkeitsachse** (*Intensity*) der Linie durch die Ecken Schwarz (0,0,0) und Weiß (1,1,1)!
- Die **Sättigung** (*Saturation*) eines Farbpunkts auf der Sättigungachse ist Null und erhöht sich mit dem Abstand zur Helligkeitssachse.
- Jeder Punkt im Dreieck hat die selbe **Farbnuance** (*Hue*) aber unterschiedliche Helligkeits- und Sättigungswerte, da die Schwarz und Weiß-Komponente nicht die Farbnuance ändert. Die Farbnuance wird geändert indem das Dreieck um die Helligkeitsachse rotiert wird.

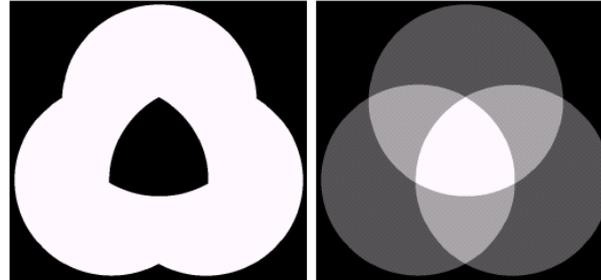
# Bildrepräsentation V

RGB



Farbnuance

Sättigung



Helligkeit

- Die **Hauptunterschiede** im Vergleich zu dem RGB Modell: Das HSV-Farbmodell **entkoppelt Farbwerte** von den **Helligkeitswerten** und erlaubt **unabhängige** Änderung von Farbnuance-, Sättigung- und Helligkeitswerten!

# Bildrepräsentation VI

Repräsentation eines 8-Bit Graustufen-Bildes im Speicher

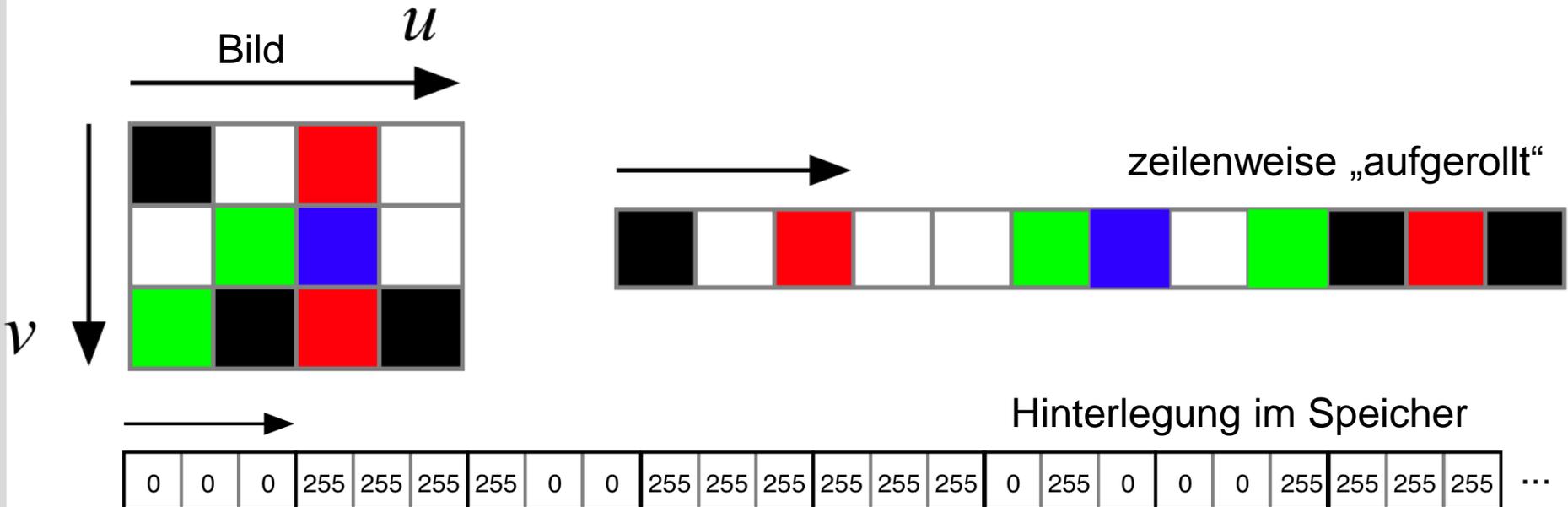
- Pixel werden zeilenweise, linear abgelegt
  - von oben links nach unten rechts
  - Achtung: z.B. bei Bitmaps von unten links nach oben rechts
- Graustufen-Kodierung:
  - Ein Byte pro Pixel
  - 0 schwarz, 255 weiß, dazwischen Graustufen



# Bildrepräsentation VI

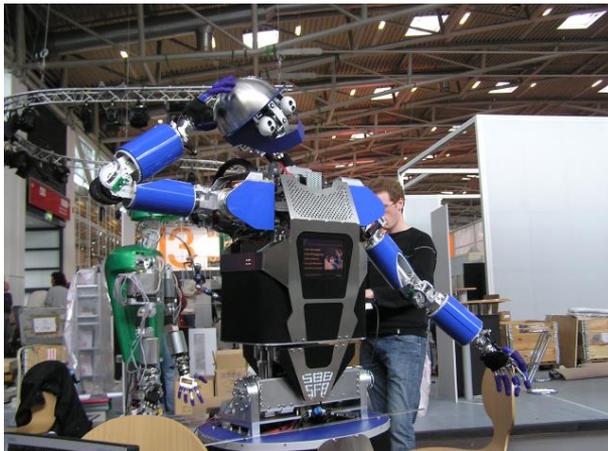
Repräsentation eines RGB24 Farbbildes im Speicher

- Pixel werden zeilenweise, wie beim Graustufen-Bild, abgelegt
- Farbkodierung:
  - Drei Bytes pro Pixel
  - Für jeden Kanal gilt: 0 minimale, 255 maximale Intensität

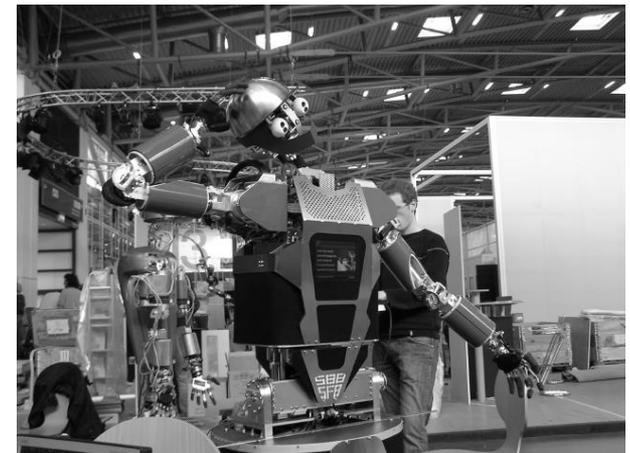
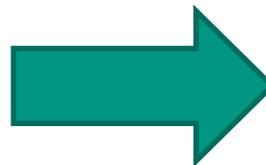


# Grauwert-Transformation

- Transformation von RGB24 nach 8Bit Graustufen
  - Eine Möglichkeit:  $g = (R + G + B) / 3$
  - Aber: Menschliches Auge ist am empfindlichsten gegenüber der Farbe Grün, ...
  - Üblicherweise wird deshalb verwendet:  
 $g = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B$



Farbbild



Graustufenbild

# Literatur

- Bildgebende Sensoren
  - Robotik 3 Skript
  - Dokumentation „Einführung in die CCD-Technologie“ von PCO
  - Buch von Pedram Azad – Kap 1.4
- Kamerasysteme
  - Buch von Pedram Azad – Kap 1.3 & 1.5
- Bildrepräsentation
  - Buch von Pedram Azad – Kap 2.3

# Literatur

- Computer Vision – Das Praxisbuch
  - Pedram Azad, Tilo Gockel und Rüdiger Dillmann
  - ISBN 978-3-89576-165-2
- Automatische Sichtprüfung
  - J. Beyerer, F. Puente León und C. Frese
  - ISBN 978-3-662-47785-4
- Visual Perception for Manipulation and Imitation in Humanoid Robots
  - Pedram Azad
  - ISBN 3642042287

