

# Messtechnik 2 – Übersicht

Grundlagen ✓

Geometrische und mechanische Größen ✓

Optische Größen  
Messen aus Bildern



Schwerpunktthema,  
die nächsten 3-4 VO Einheiten

Temperatur

Druck

Durchfluss, Viskosität, Dichte, Füllstand

Akustische Größen

Ionisierende Strahlung

# Messen optischer Größen

## Messen aus Bildern

### Übersicht

Optische Strahlung, Sensorik  
Geometrie, Photogrammetrie

- Kamerakalibrierung
- Stereo

Menschliche Wahrnehmung  
Digitale Bildanalyse

- Digitales Rasterbild, Kenngrößen
- Bildverarbeitungsoperationen, Segmentation
- Salient point detection + description

# Licht – optische Strahlung

## Teilbereich der *elektromagnetischen* Strahlung

Benennung der Strahlung	Spektralbereiche		Wellenlänge $\lambda$ in nm
	Kurzzeichen		
Vakuum-UV	UV (Ultra- violett)	UV-C VUV	100 ... 200
Fernes UV		FUV	200 ... 280
Mittleres UV		UV-B	280 ... 315
Nahes UV		UV-A	315 ... 380
Licht	VIS		380 ... 780
Nahes IR	IR (Infra- rot)	NIR IR-A	780 ... 1400
		IR-B	1400 ... 3000
Mittleres IR		IR-C MIR	3000 ... 50000
Fernes IR		FIR	50000 ... $10^6$

[Hoffmann, TB der MT]

Tabelle 3.3 Strahlung im optischen Bereich,  
Benennung der Wellenlängenbereiche

# Wellen- / Quantenmodell

Quantenelektrodynamik (QED): Dualismus Welle Teilchen

## Photon

Ruhemasse

$$m_{Ph} = 0$$

Quanten-, Photonenenergie:

$$W_{Ph} = hf \quad (= h\nu)$$

Plank'sches Wirkungsquant:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$$

de-Broglie Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{c}{f}$$

Impuls:

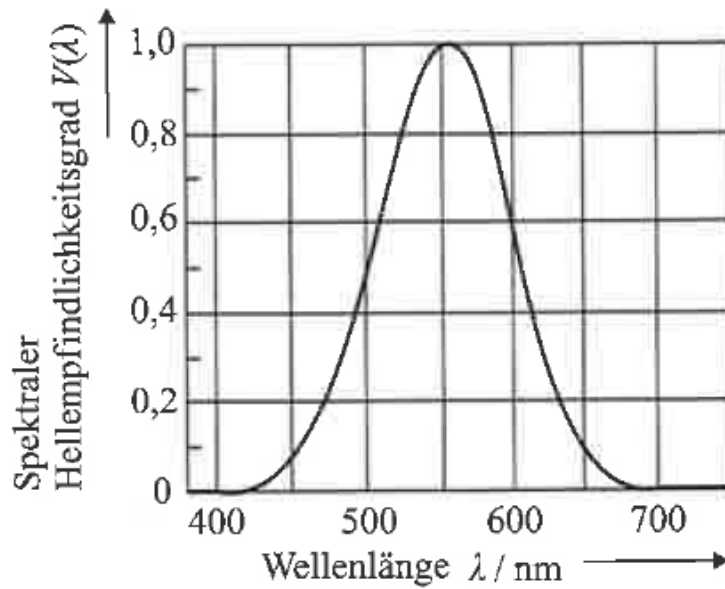
$$p = \frac{W_{Ph}}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

# $V(\lambda)$ – Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für Tagsehen des menschlichen Auges

“Relative sensitivity” =  $V(\lambda)$

*Commission International de l’Eclairage (CIE)*

max. bei 555nm



→ Strahlungsphysikalische vs. Lichttechnische Größen

[Hoffmann, TB der MT]

*Bild 3.196 Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für Tagsehen  $V(\lambda)$*

# Strahlungsphysikalische (radiometrische)

—

# Lichttechnische Größen (fotometrische)

Index e ... energetisch  
vis ... sichtbar

[Hoffmann, TB der MT]

Tabelle 3.4 Lichttechnische und strahlungsphysikalische Größen und Einheiten

Lichttechnische Größe	Strahlungsphysikalische Größe
Lichtstrom $\Phi_{vis} = K_M \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda$ $K_M$ : fotometrisches Strahlungsäquivalent SI-Einheit: lm (Lumen)	Strahlungsfluss (Strahlungsleistung) $\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} d\lambda$ SI-Einheit: W
Beleuchtungsstärke $E_{vis} = \frac{d\Phi_{vis}}{dA_2}$ SI-Einheit: $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ lx (Lux)}$	Bestrahlungsstärke $E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2}$ SI-Einheit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Lichtstärke $I_{vis} = \frac{d\Phi_{vis}}{d\Omega_1} = \int_A L_{vis} \cos \varepsilon dA$ SI-Basiseinheit: $\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} = \text{cd (Candela)}$	Strahlstärke $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_1}$ SI-Einheit: $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$
Leuchtdichte $L_{vis} = \frac{dI_{vis}}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$ SI-Einheit: $\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Strahldichte $L_e = \frac{dI_e}{dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$ SI-Einheit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Spezifische Lichtausstrahlung $M_{vis} = \frac{d\Phi_{vis}}{dA_1} = \int_{\Omega_1} L_{vis} \cdot \cos \varepsilon_1 d\Omega_1$ SI-Einheit: $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$	Spezifische Ausstrahlung $M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1}$ SI-Einheit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Lichtmenge $Q_{vis} = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{vis} dt$ SI-Einheit: $\text{lm} \cdot \text{s}$	Strahlungsmenge $Q_e = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{e\lambda} dt$ SI-Einheit: $\text{W} \cdot \text{s}$

Index 1: Ausstrahlung, Index 2: Einstrahlung;  $K_M = 683 \text{ lm/W}$

$\Omega$ : Raumwinkel, Einheit: Steradian (sr), voller Raumwinkel:  $\Omega_0 = 4\pi \text{ sr}$

$\varepsilon$ : Winkel zwischen der Flächennormale und dem Raumwinkelement  $d\Omega$

# Lichtquellen

## Temperaturstrahler

- Schwarze Strahler
- Glühlampen
- Lichtbogen

## Lumineszenzstrahler

- Leuchtstoffröhren
- LEDs
- Kohärente Quellen (Laser)

# Schwarzer Strahler

Idealer Absorber

Ideale Strahlungsquelle

*wellenlängenunabhängig*

Absorptionskoeffizient = 1

Emissionskoeffizient = 1

$$\text{Plank'sches Strahlungsgesetz: } M_{e\lambda} = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{hc_0/\lambda kT} - 1} \right)$$

$h$  ... Plank'sches Wirkungsquant

$c_0$  ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$k$  ... Boltzmann-Konstante

$$\text{Wien'sches Verschiebungsgesetz: } \lambda_{max} T = const. = \frac{hc}{4,996 k} = 2,8971 \mu\text{m K}$$



# Spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlung

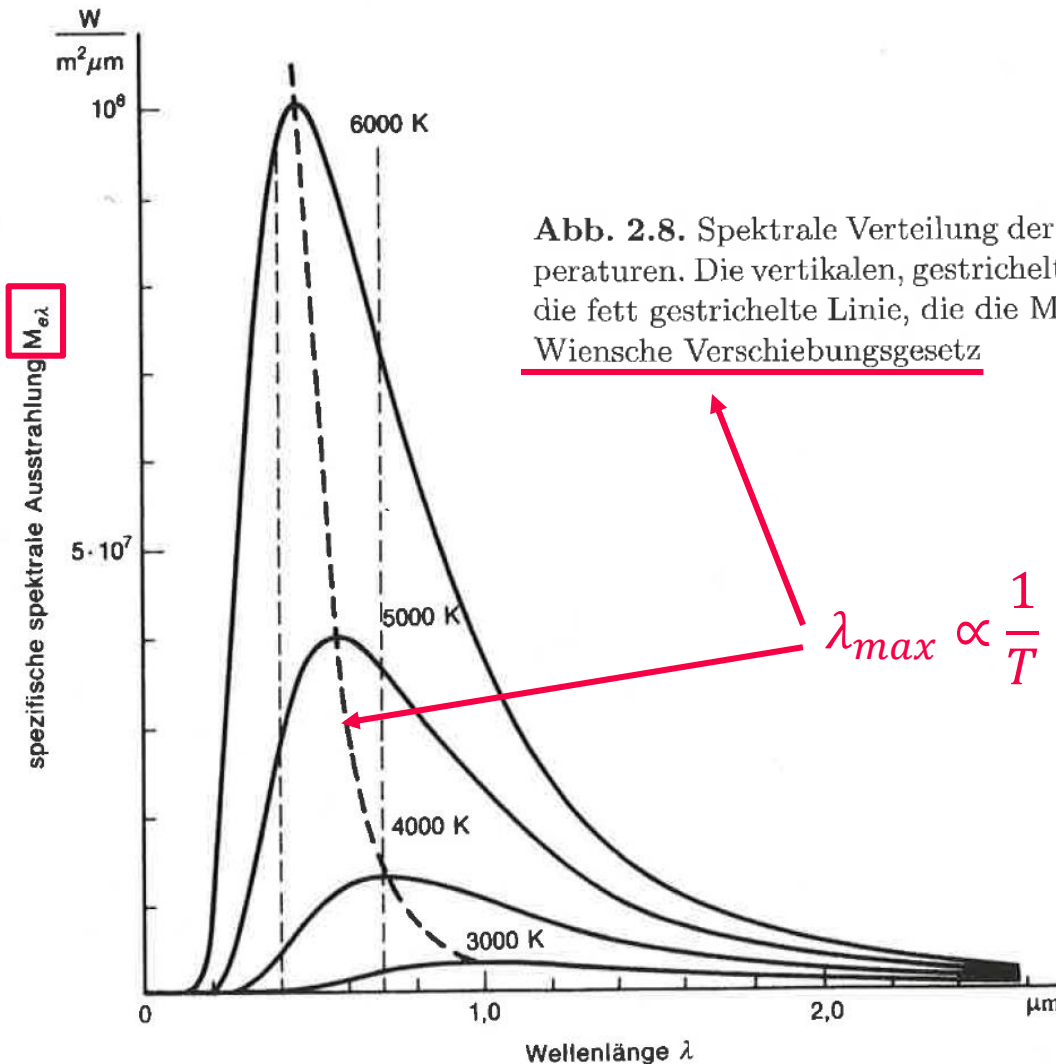


Abb. 2.8. Spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlung für vier verschiedene Temperaturen. Die vertikalen, gestrichelten Linien kennzeichnen das sichtbare Spektrum und die fett gestrichelte Linie, die die Maxima der vier Kurven verbindet, kennzeichnet das Wiensche Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T}$$

[Pedrotti et al.,  
Optik für Ingenieure]

# Solare Bestrahlungsstärke

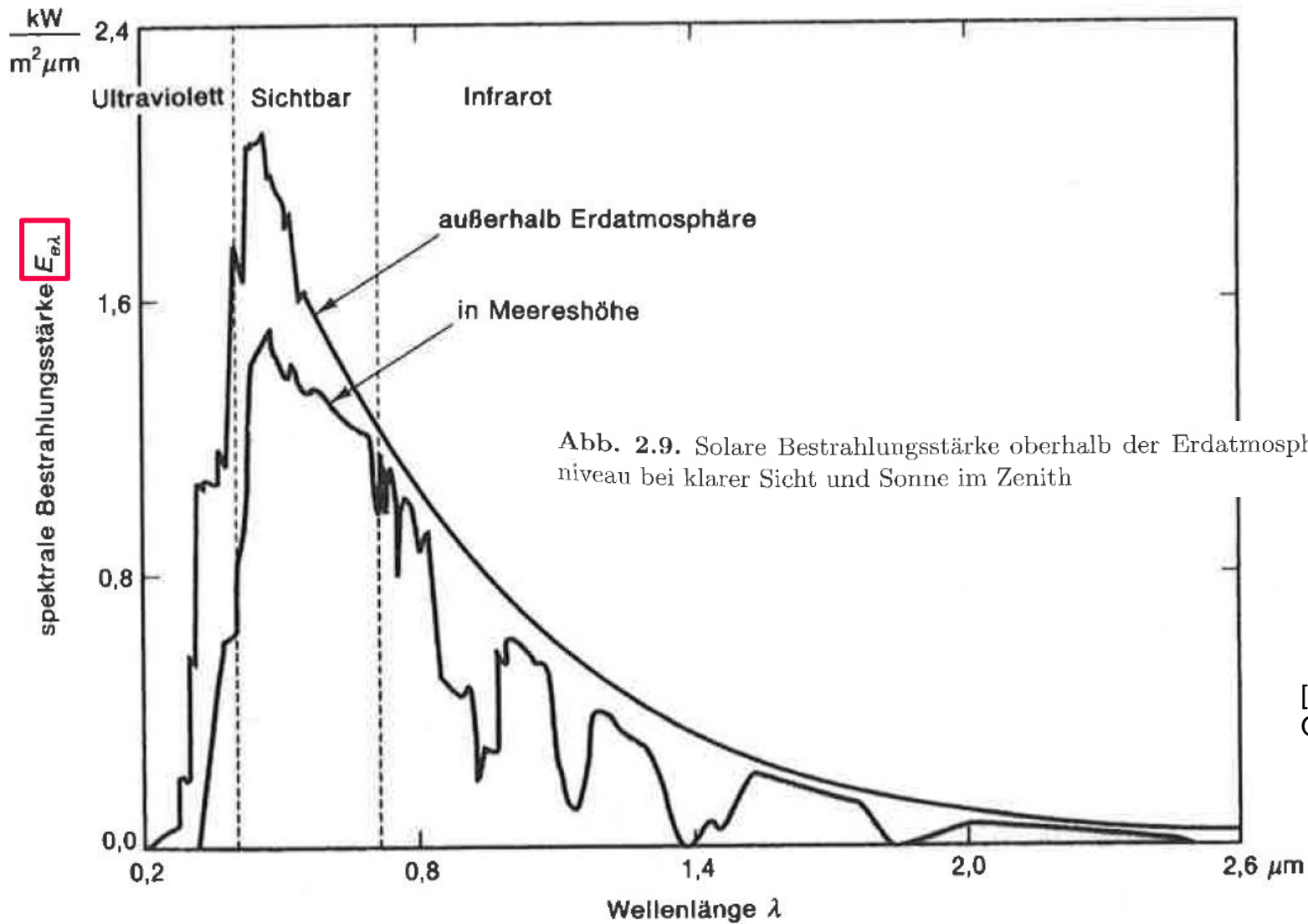


Abb. 2.9. Solare Bestrahlungsstärke oberhalb der Erdatmosphäre bzw. auf Meeresebene bei klarer Sicht und Sonne im Zenith

[Pedrotti et al.,  
Optik für Ingenieure]

# Physikalische Effekte, Detektoren

## Äußerer Photoelektrischer Effekt:

- Photon  $\leftrightarrow$  Metall: Photon löst Elektron aus Kathode
- Photozelle, Sekundärelektronen-Vervielfacher

## Innerer Photoelektrischer Effekt:

- Photon  $\leftrightarrow$  Halbleiter: Photon generiert Elektron-Loch Paar(e)
- Photodiode, -transistor, -widerstand

## Thermische Detektoren:

- Breitbandig, schwarze Membran absorbiert Photonen  $\rightarrow$  Erwärmung
- Bolometer, Thermokette, pyroelektrischer Sensor

## Spezialfälle:

- QWIP

Strahlungsthermometer

# Fotowiderstand (1)

LDR (light dependent resistor)

polaritätsunabhängig

Betrieb mit Wechselspannung möglich

Empfindlichkeit von  $\lambda$  abhängig

stark Temperatur abhängig

zeitliche Verzögerung

irreversible Alterung,...

# Fotowiderstand (2)

Achtung!

R sinkt bei Lichteinfall  $\rightarrow R_{\text{Hell}}$ ,  $R(t)$  steigt nach Abschattung !!  
 $\rightarrow$  träge!

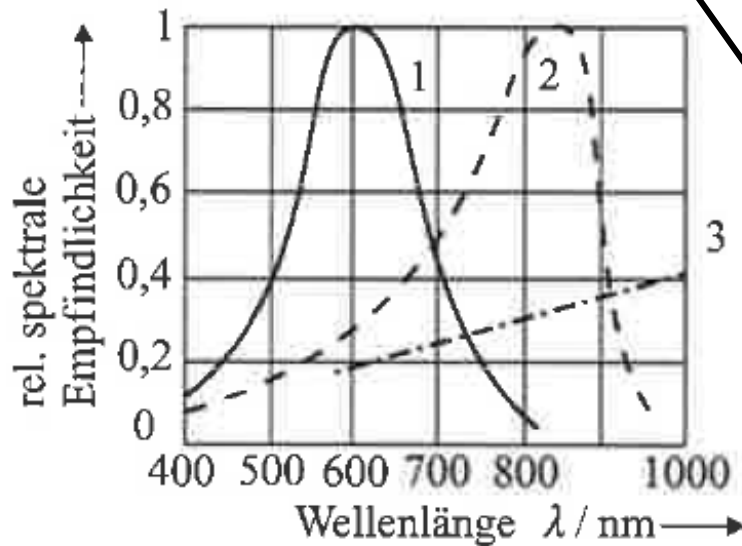


Bild 3.197 Relative spektrale Empfindlichkeit von Fotowiderständen (nach /3.14.13/)  
 1 CdS (dotiert), 2 CdSe, 3 PbS

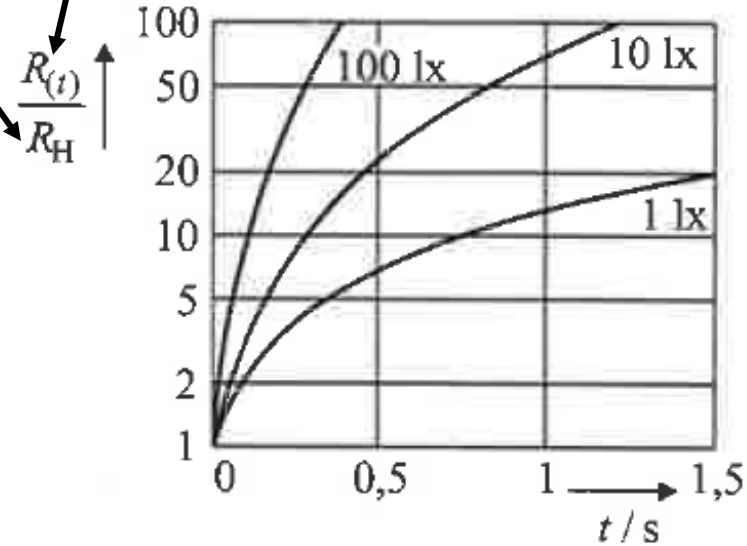


Bild 3.198 Relative Widerstandszunahme eines Fotowiderstands in Abhängigkeit von Zeit und Beleuchtungsstärke (nach /3.14.5/)

[Hoffmann, TB der MT]

# Fotodiode

Sperrstrom steigt streng proportional zur Beleuchtungsstärke  $E$

Empfindlichkeit proportional Fläche

Spektrale Empfindlichkeit ( $\rightarrow$  Diagramm)

Hohe Grenzfrequenz

Parameterstabil

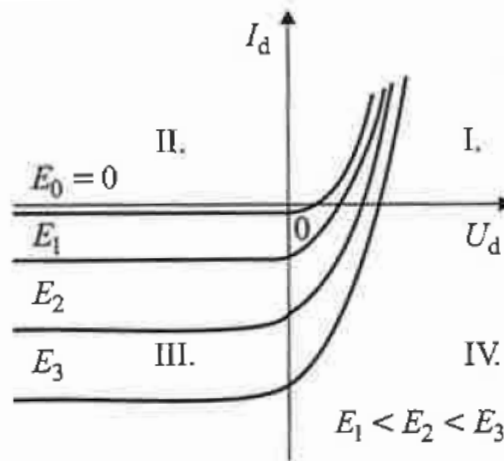


Bild 3.199 Kennlinienfeld einer Fotodiode mit dem Parameter Beleuchtungsstärke  $E$

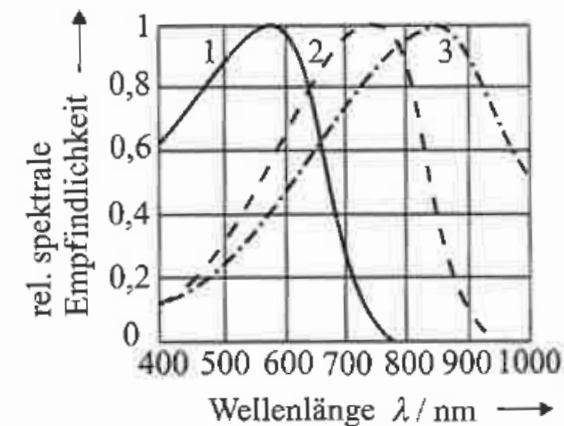


Bild 3.200 Relative spektrale Empfindlichkeit verschiedener Halbleiter (nach /3.14.13/) 1 Se, 2 GaAs, 3 Si

[Hoffmann, TB der MT]

# Fotodiode Betriebsarten

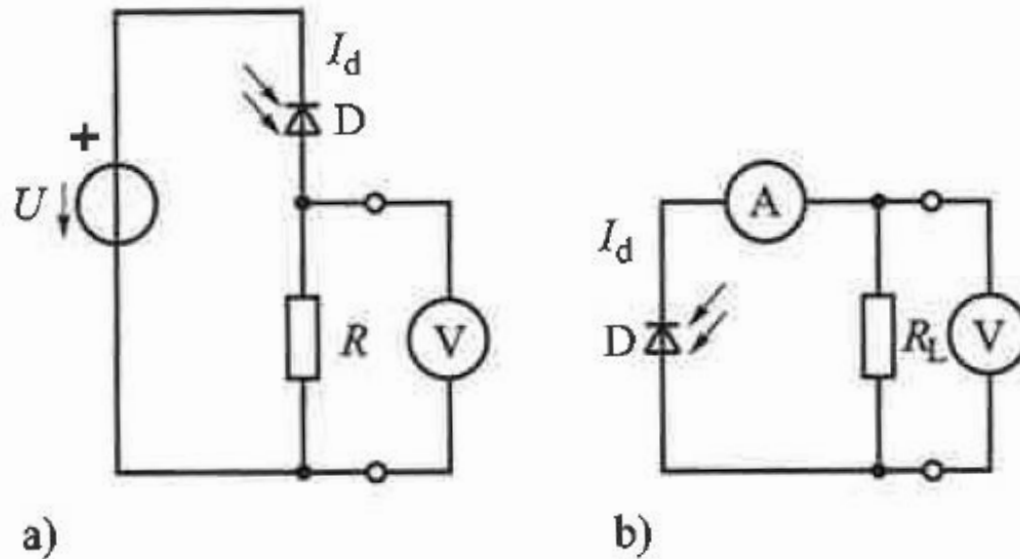


Bild 3.201 Betriebsarten der Fotodiode  
 a) Sperrbetrieb, b) Elementbetrieb

[Hoffmann, TB der MT]

# Fototransistor

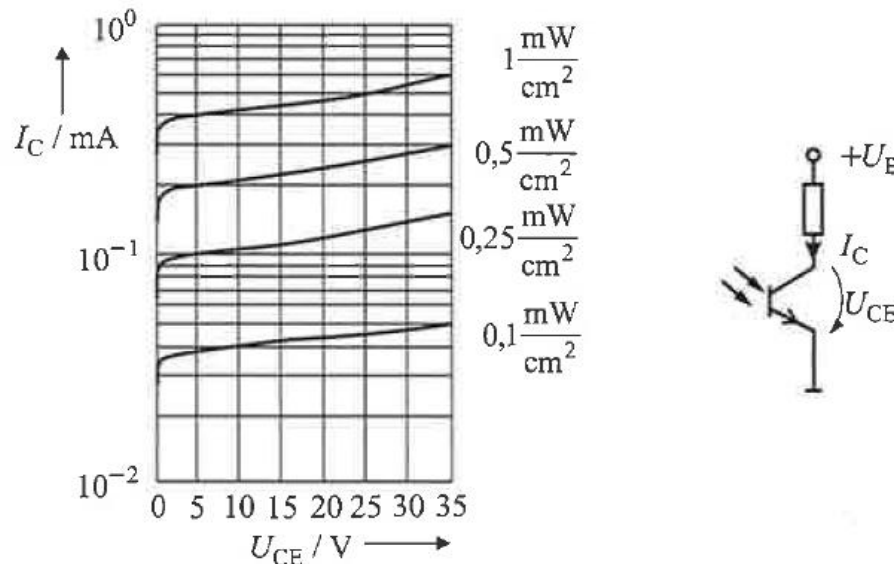
Sperrstrom der Kollektor-Basis-Diode

Verstärkung  $\rightarrow$  Kollektorstrom

Empfindlicher als Fotodiode

Nichtlineare Kennlinie

Dynamisches Verhalten ungünstiger als Fotodiode



[Hoffmann, TB der MT]

Bild 3.205 Kennlinienfeld und Schaltbild eines Fototransistors /3.14.7/



# Bildsensoren in Kameras

Integrierte Fotosensoren

Zeile / Fläche

Integrierte Schaltungen für Ladungstransport, -verstärkung, Steuerlogik

Farbe / monochrom

Sensorprinzipien:

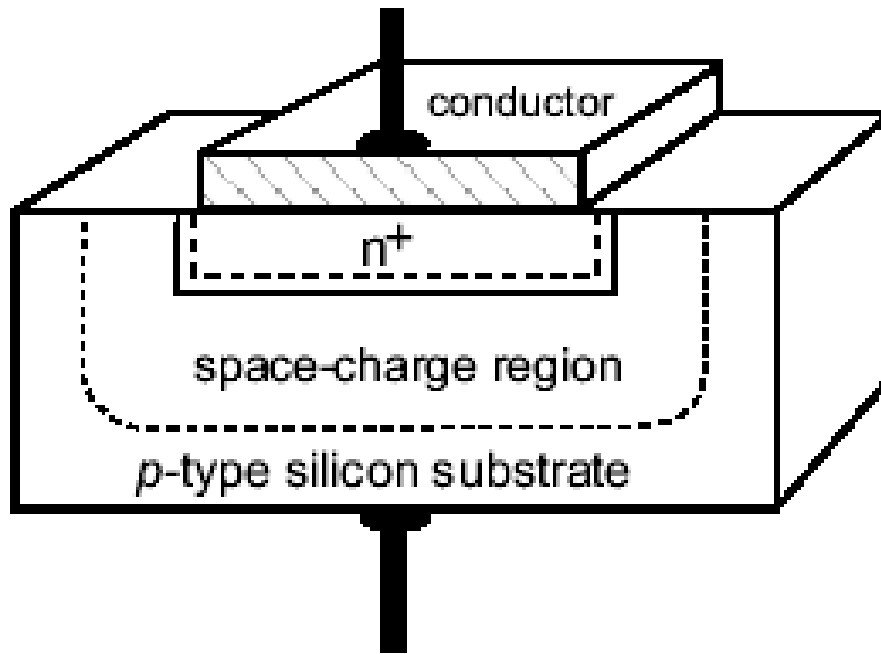
- MOS-Kapazitäten: CCD-Sensoren (charge-coupled device)
- Photodioden Array: CMOS-Sensoren

Es entsteht ein digitales Rasterbild → digitale Bildverarbeitung

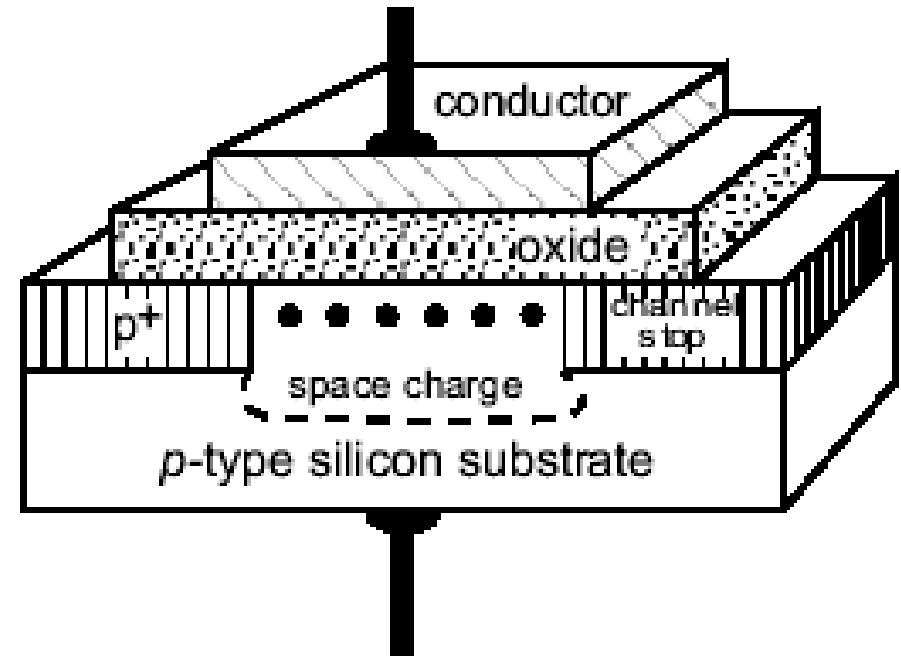
# CCD / CMOS Sensor-Prinzip

images credit: Seitz Chapter 7 in Jähne et al. (eds) Handbook of Computer Vision

*a* CMOS – Photodiode



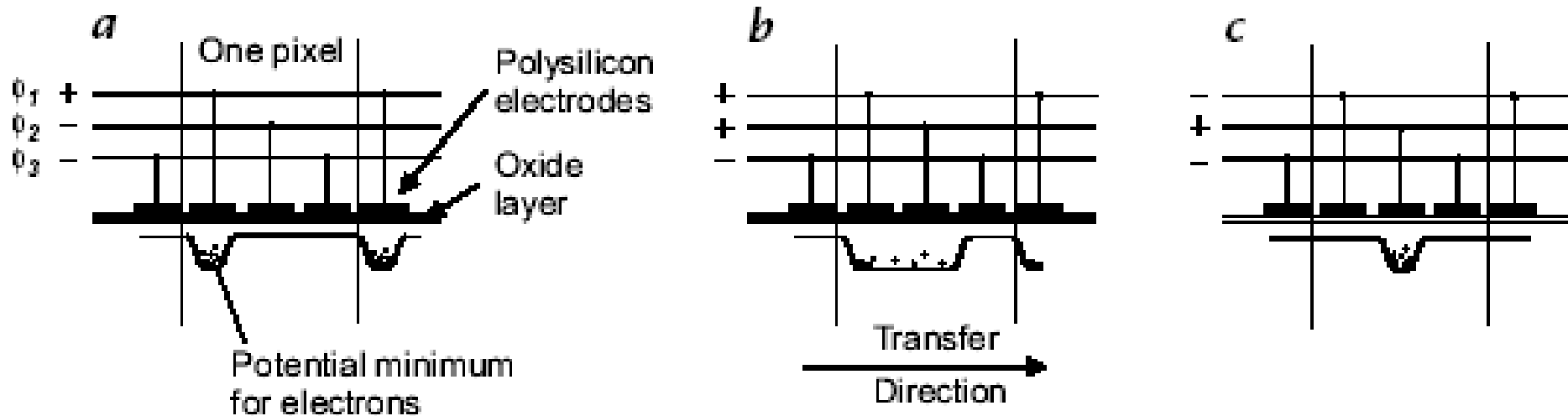
*b* CCD – MOS Kapazität



*Figure 7.6: Cross sections through the two major types of electrical field generating and charge storing devices in semiconductors: a photodiode, consisting of a reverse-biased p-n junction; b MOS capacitance, consisting of a (transparent) electrode on the semiconductor material, separated by a dielectric insulation.*

# CCD Ladungsträger-Transport

Schieberegister:

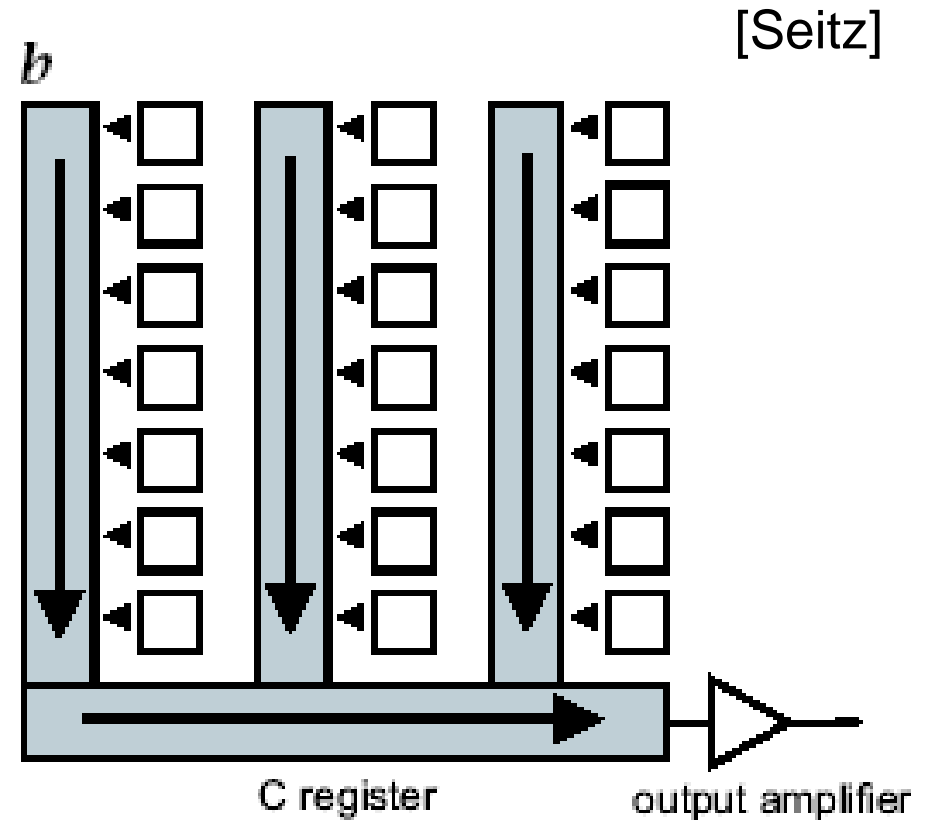
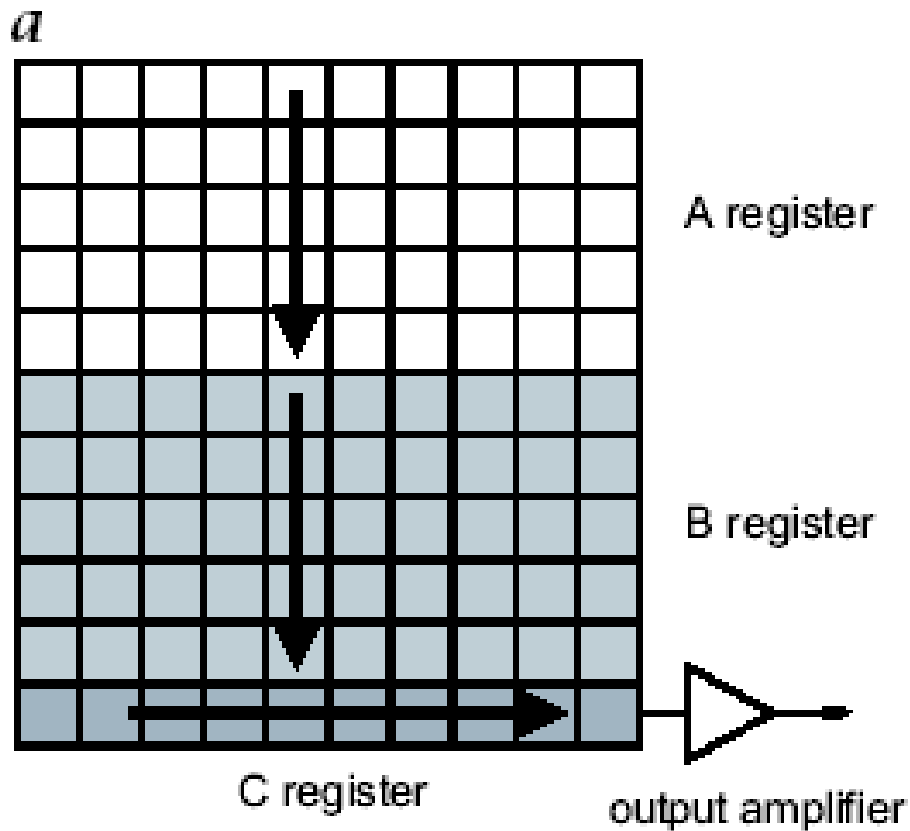


*Figure 7.13: Illustration of the charge transport principle in CCDs. Different stages of the electrode clocking and charge shifting sequence are shown in a, b and c.*

[Seitz]

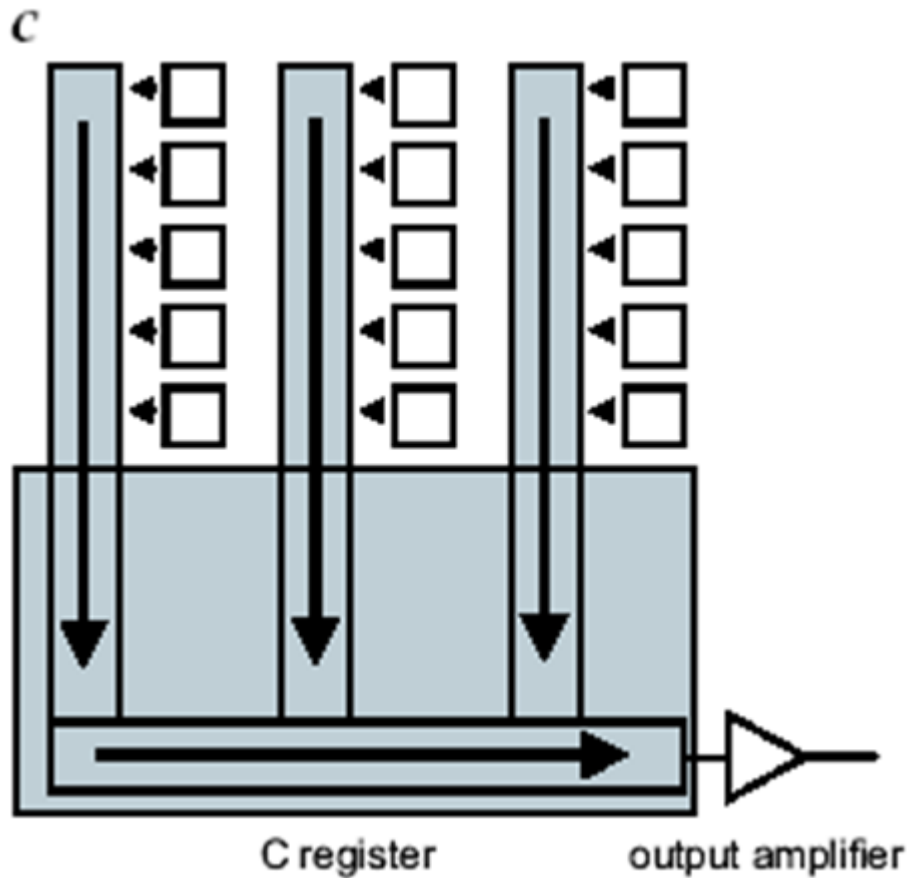
# CCD Architekturen (1)

- a) Frame transfer CCD (FT-CCD)
- b) Interline transfer CCD (IT-CCD)



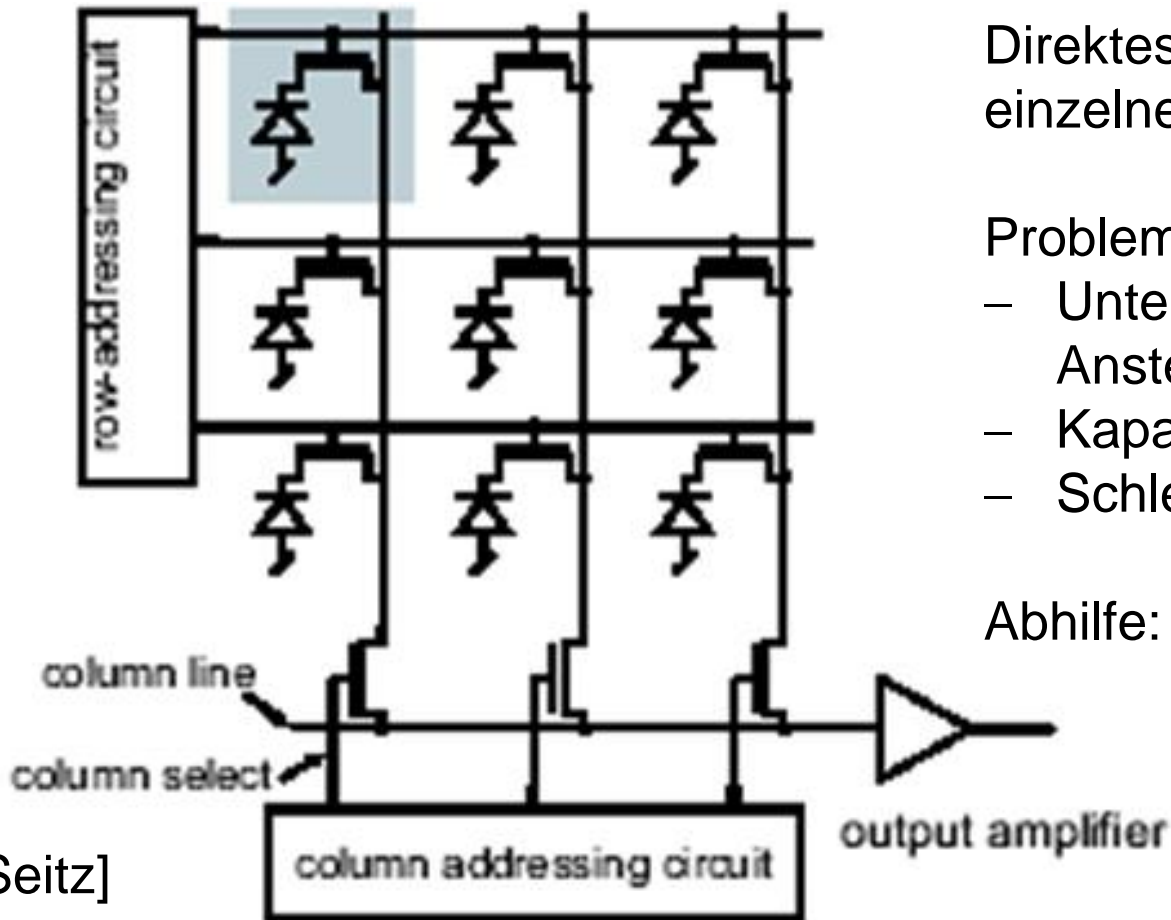
# CCD Architekturen (2)

## c) Frame and interline transfer CCD (FT+IT-CCD)



[Seitz]

# CMOS-Sensor: PD-Array



[Seitz]

Direktes adressieren einzelner Pixel möglich!

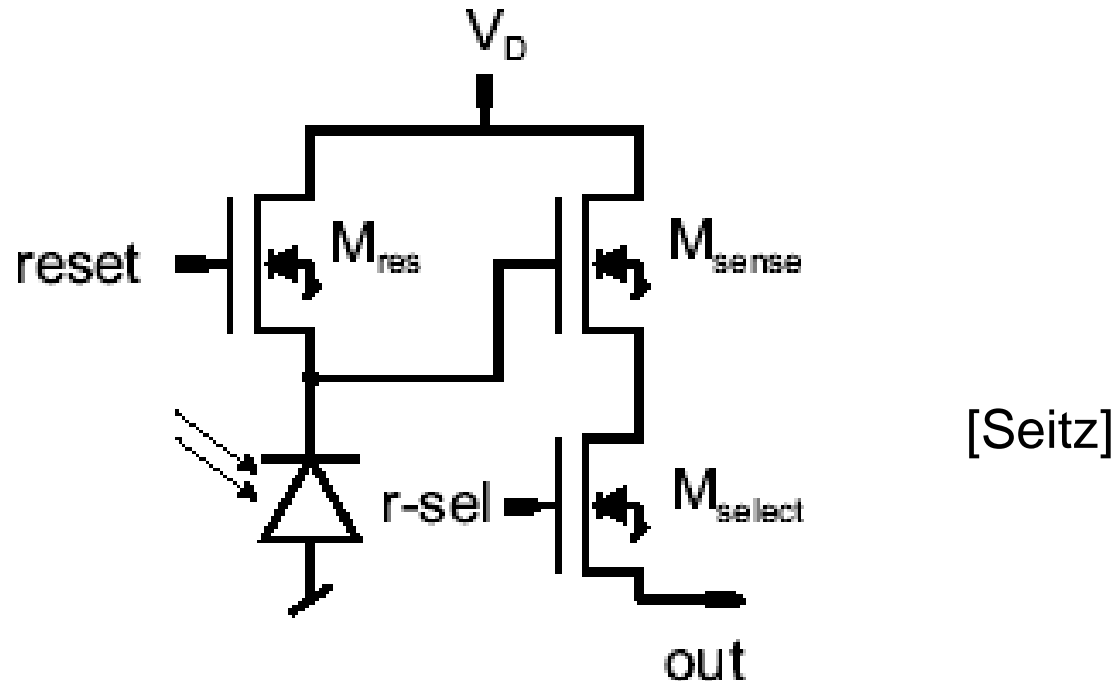
Probleme:

- Unterschiedlich lange Ansteuerungs-Leitungen
- Kapazitives Rauschen
- Schlechte SNR

Abhilfe: Active Pixel Sensor!

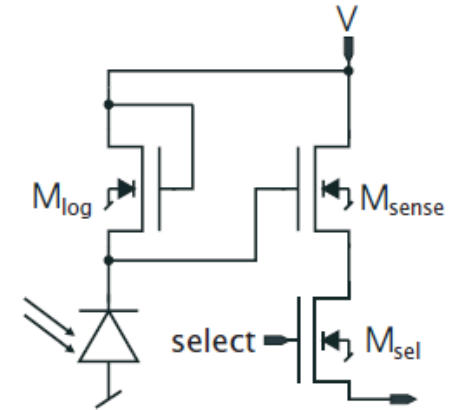
# CMOS APS – Active Pixel Sensor

Vorverstärkung *direkt* beim einzelnen Pixel → Wesentlich *bessere* SNR



*Figure 7.17: Schematic diagram of an APS pixel, consisting of a photodiode, a reset transistor, a sense transistor, and a row-select transistor. The active load transistor that completes the source-follower circuit is shared by all pixels in a column, and it is therefore needed only once per column.*

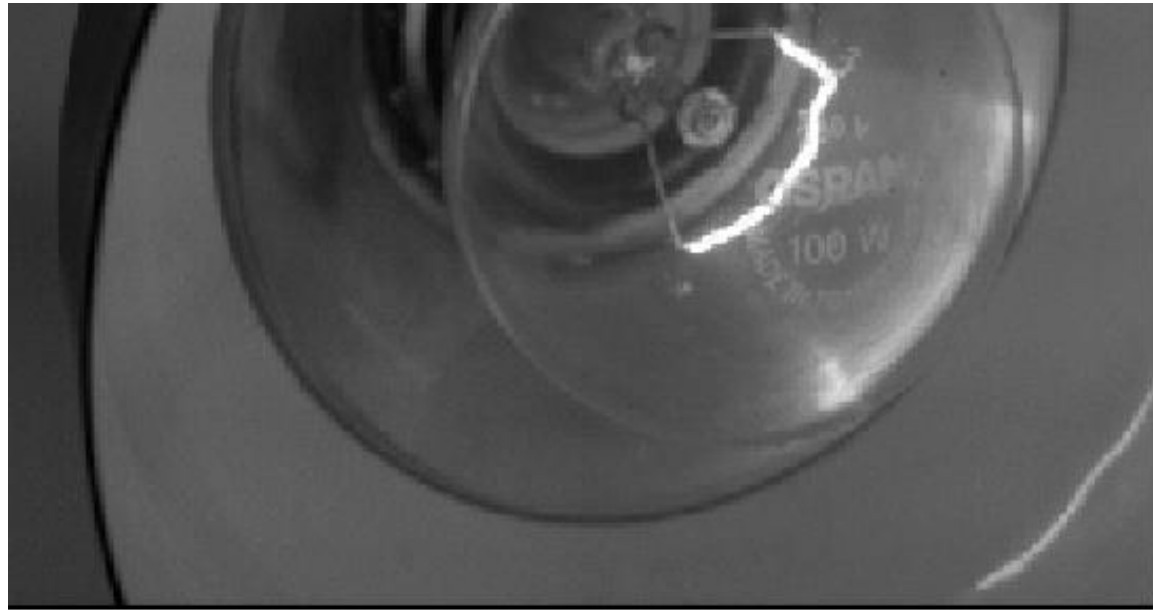
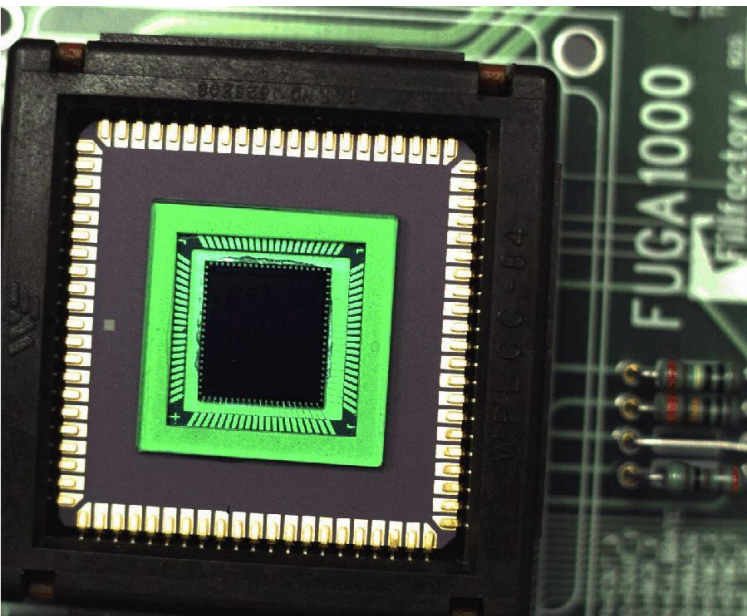
# CMOS Kamera mit logarithmischer Charakteristik



[Seitz]

*Fuga 1000 Sensor*

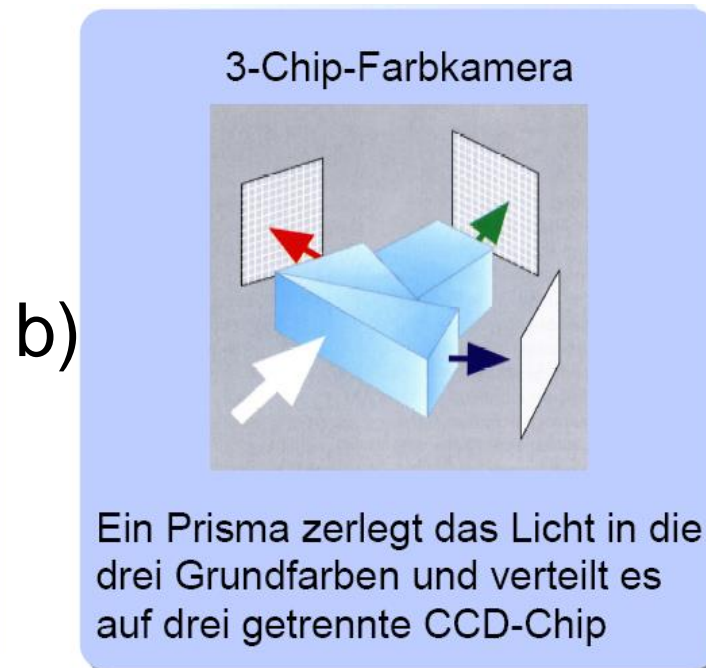
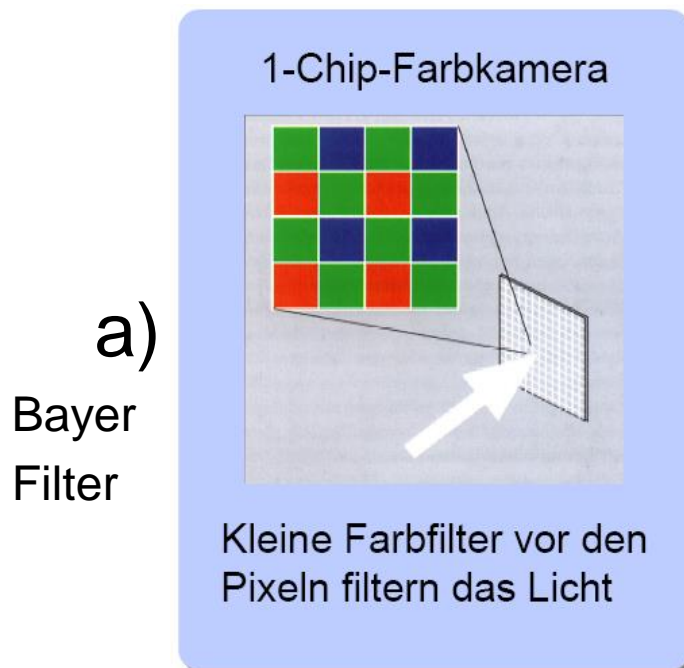
*Bild: log.Char.!!*





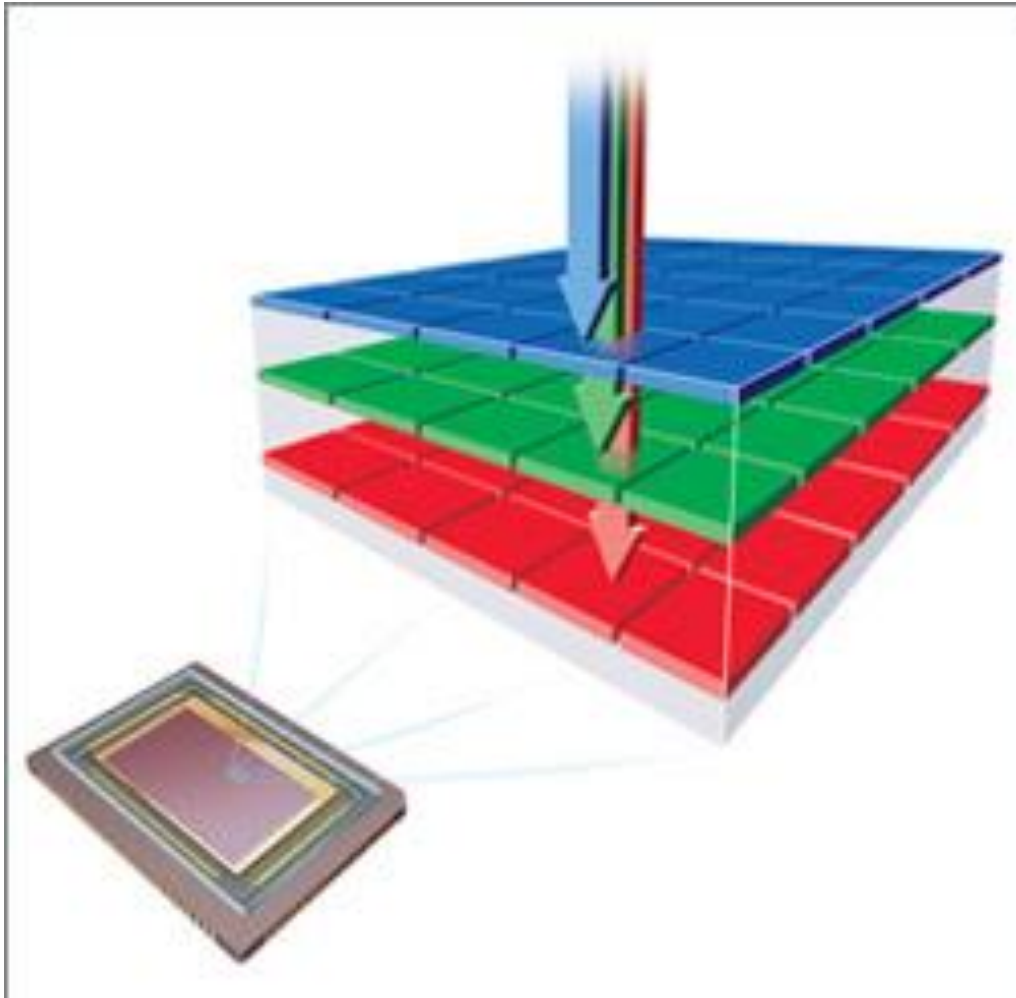
# Bauarten von Farbsensoren

- a) Filter (Streifen, diagonale Streifen, *Bayer-filter*)
- b) 3-chip (Zerlegung in rot/grün/blau-Anteile mit Prismen)
- c) Foveon X3: Eindringtiefe von Photonenenergie abhängig



[http://www.panasonic-electric-works.at/pewat/de/safedownloads/dd\\_x633\\_de\\_fb\\_grundlagen\\_farbbildverarbeitung\\_0806.pdf](http://www.panasonic-electric-works.at/pewat/de/safedownloads/dd_x633_de_fb_grundlagen_farbbildverarbeitung_0806.pdf)

# Foveon X3

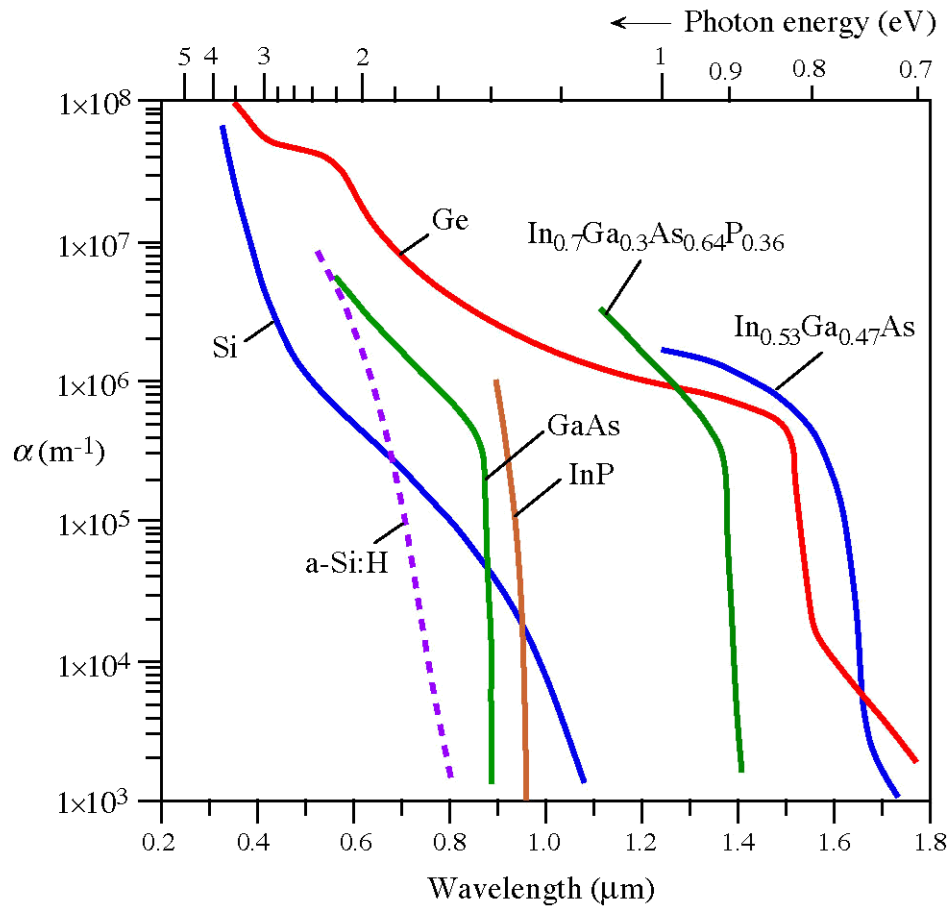


e.g. SIGMA SD10  
 10.2 Mpixel =  
 3.4 Mpixel \* 3 !!!  
 (R+G+B)

2011  
 SIGMA SD1  
 15.3 Mpixel \* 3 !!!



# Foveon X3 nutzt Eindringtiefe



Absorptionskoeffizient  $\alpha$

Eindringtiefe  $\delta = 1/\alpha$

[S.O. Kasap,  
Optoelectronic devices and photonics]

# Vergleich CMOS – CCD Sensoren

## **CMOS**

- Gutes SNR
- Pixel direkt adressierbar
- Kleiner Füllfaktor
- Lineare oder log. Charakteristik
- Programmierbare pixel
- Standard CMOS Technologie
  - wie RAM Speicher
- Kein Blooming / Smearing
  
- Heute hauptsächlich CMOS

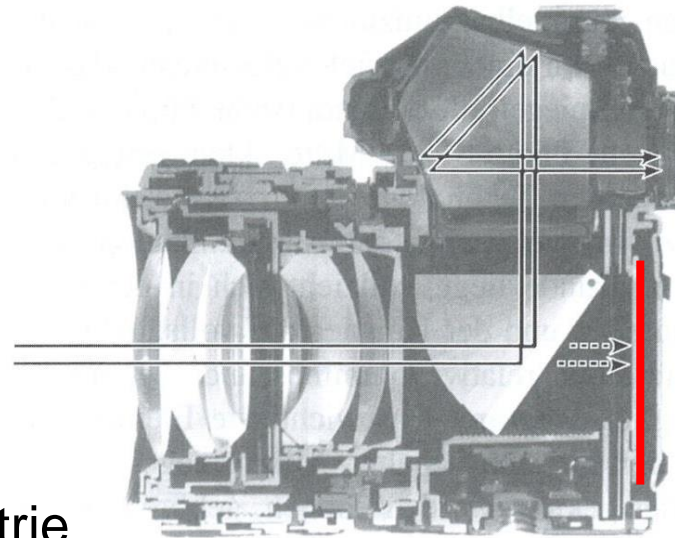
## **CCD**

- Sehr gutes SNR
- Seriellles auslesen (Schieberegister)  
je nach Bauart größerer Füllfaktor
- Linear
  
- zusätzliche Strukturen  
(z.B. Sperrfilter-Kämme)
- Blooming / Smearing
  
- bis 2000 vorwiegend CCD-Chips

# Geometrie (griech.: „Erdmass“, „Erdvermessung“)

## Photogrammetrie: „Messen aus Bildern“

Nun wird der Bildsensor / analoge Film in eine reale Kamera eingebaut:



[E. Hecht, Optik]

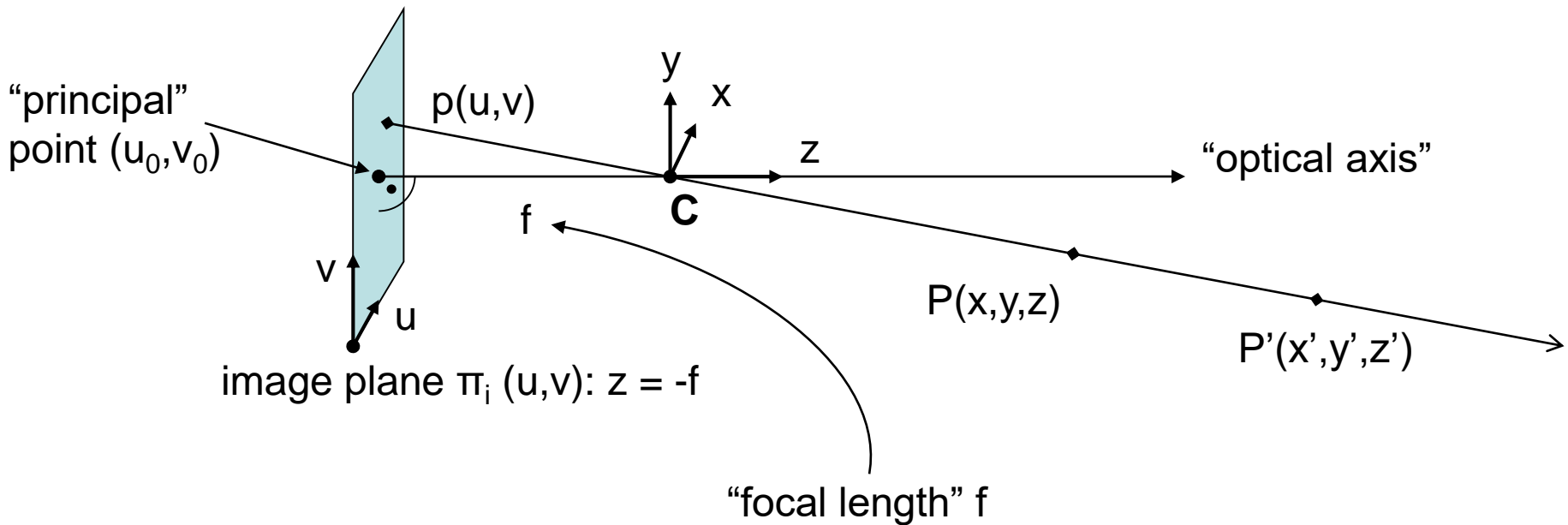
Einäugige Spiegelreflexkamera. Licht fällt durch das Objektiv auf den Spiegel, wird nach oben zum Prisma und von dort zum Auge umgelenkt. Wird der Verschluss ausgelöst, so klappt der Spiegel nach oben und das Licht trifft direkt auf den Film; anschließend klappt der Spiegel wieder nach unten. (Photo: E.H.)

Übersicht:

- Lochkamera
- Projektive Geometrie
- Kamerakalibrierung
- Linsenverzeichnung
- Messen mit 1 Kamera
- Stereo (2 Kameras), Multiview (Video von einer bewegten Kamera)

*SLR: “single lens, reflex mirror”*

# Lochkamera – Pinhole Camera



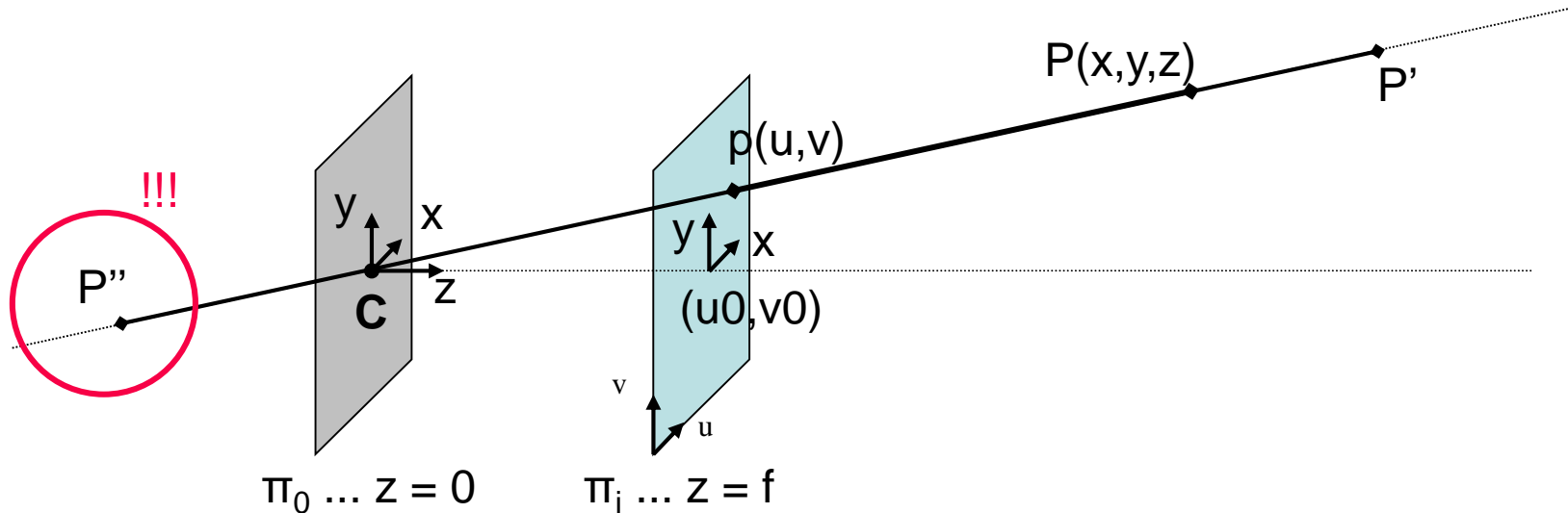
“real” camera

“Pinhole”  $C$  ... “center of projection”

2D projection  $\leftarrow$  3D scene

$p(u,v) \leftrightarrow$  line of sight = viewing **direction**

# Projective Geometry

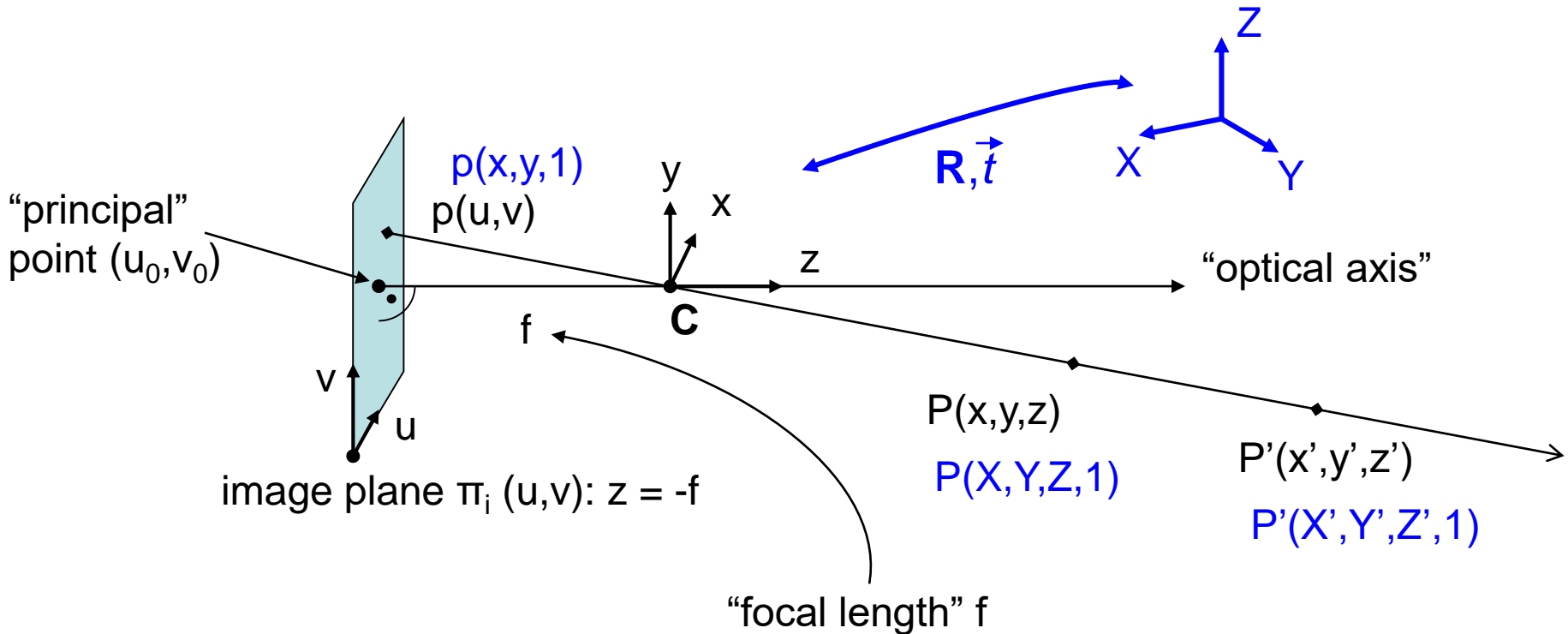


“projective” camera, “normalized” camera:  $f = 1$   
 1 stationary camera  $\rightarrow$  1 coordinate system  $(x, y, z)$   
 camera-centered coordinate system  $\equiv$  scene coordinate system

Only points in  $\pi_0$  are not projected to  $\pi_i$

$\rightarrow$  Pinhole camera  $\leftrightarrow$  projective geometry, **except: telecentric lenses !**

# Lochkamera – Pinhole Camera



“real” camera

“Pinhole”  $C$  ... “center of projection”

2D projection  $\leftarrow$  3D scene

$p(u,v) \leftrightarrow$  line of sight = viewing **direction**

“interior” camera parameters

–  $u_0, v_0, f, \dots$

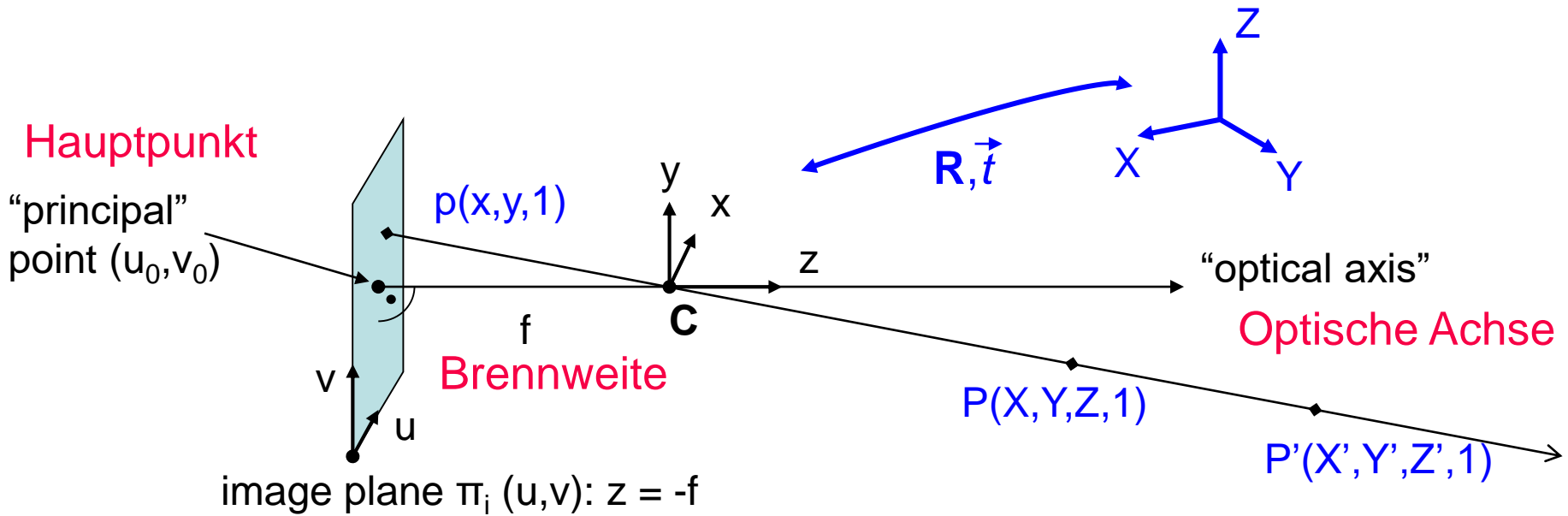
“exterior” parameters

– camera pose

–  $R, \vec{t}$



# Lochkamera – Pinhole Camera



$$\vec{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \vec{P}$$

$\mathbf{P}$  ... Projektionsmatrix

Homogene Koordinaten  
Lineare Algebra

# Kamerakalibrierung

## Bestimmung der *inneren* Parameter

- Maximal 5 lineare Parameter („innere Orientierung“)
- Brennweite  $f$
- Hauptpunkt  $(u_0, v_0)$
- bis zu 2 weitere lineare Parameter (horizontal scale, skew)
- Linsenverzeichnung  $\rightarrow$  nichtlinear

## *Äußere* Parameter

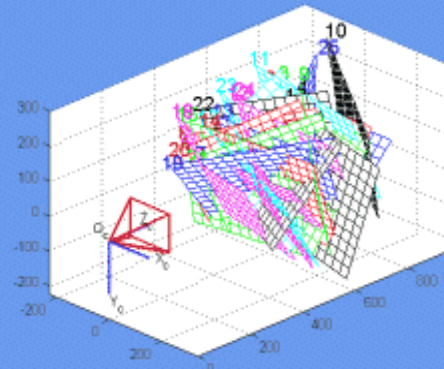
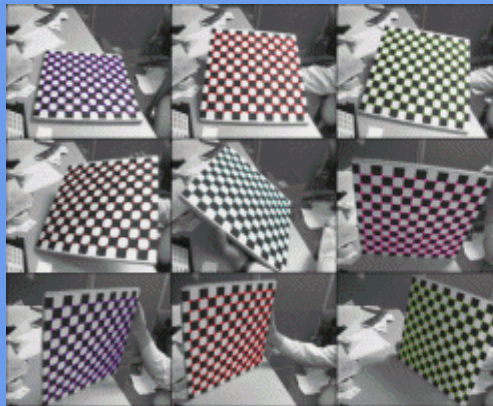
- Lage (Pose) der Kamera relativ zum Szenenkoordinatensystem
- 6 Freiheitsgrade (DoF)
- 3 DoF Translation
- 3 DoF Rotation

# Up-to-date implementation of Zhang's algorithm: Matlab camera calibration toolbox [Bouguet] (1)

[Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. PAMI 22(11), 1330-1334, 2000.]

[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)

## *Camera Calibration Toolbox for Matlab*



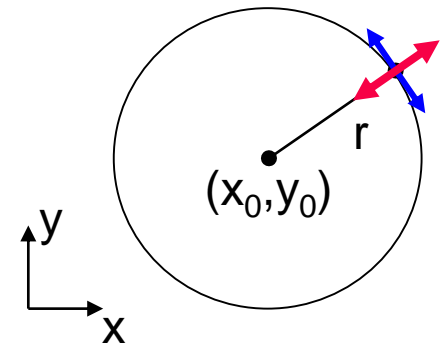
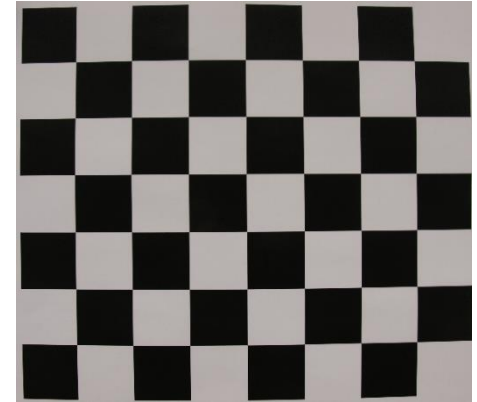
# Linsenverzeichnung

Tonnen- oder kissenförmig

Nichtlinear, viele mögliche Modelle.

Typische Vorgangsweise:

- Scene >> lens system → C is ok
- **Radial** lens distortion  $k_i$
- **Tangential** lens distortion  $t_j$
- Radial >> tangential
- Polynomial approximation up to varying order



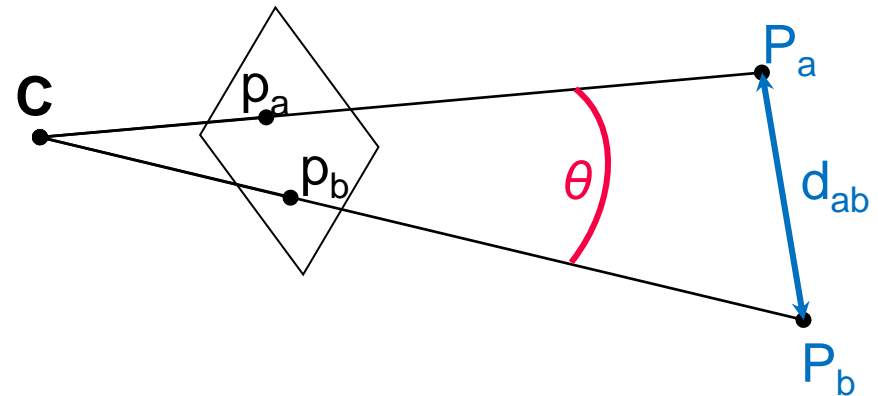
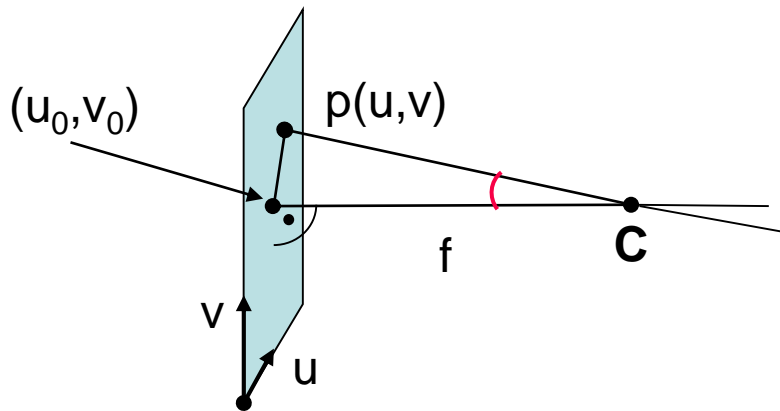
$$\bar{x} = x - x_0, \quad \bar{y} = y - y_0, \quad r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

$$x' = x + k_1 \bar{x} r^2 + k_2 \bar{x} r^4 + k_3 \bar{x} r^6 + (t_1 (2\bar{x}^2 + r^2) + 2t_2 \bar{x} \bar{y}) (1 + t_3 r^2)$$

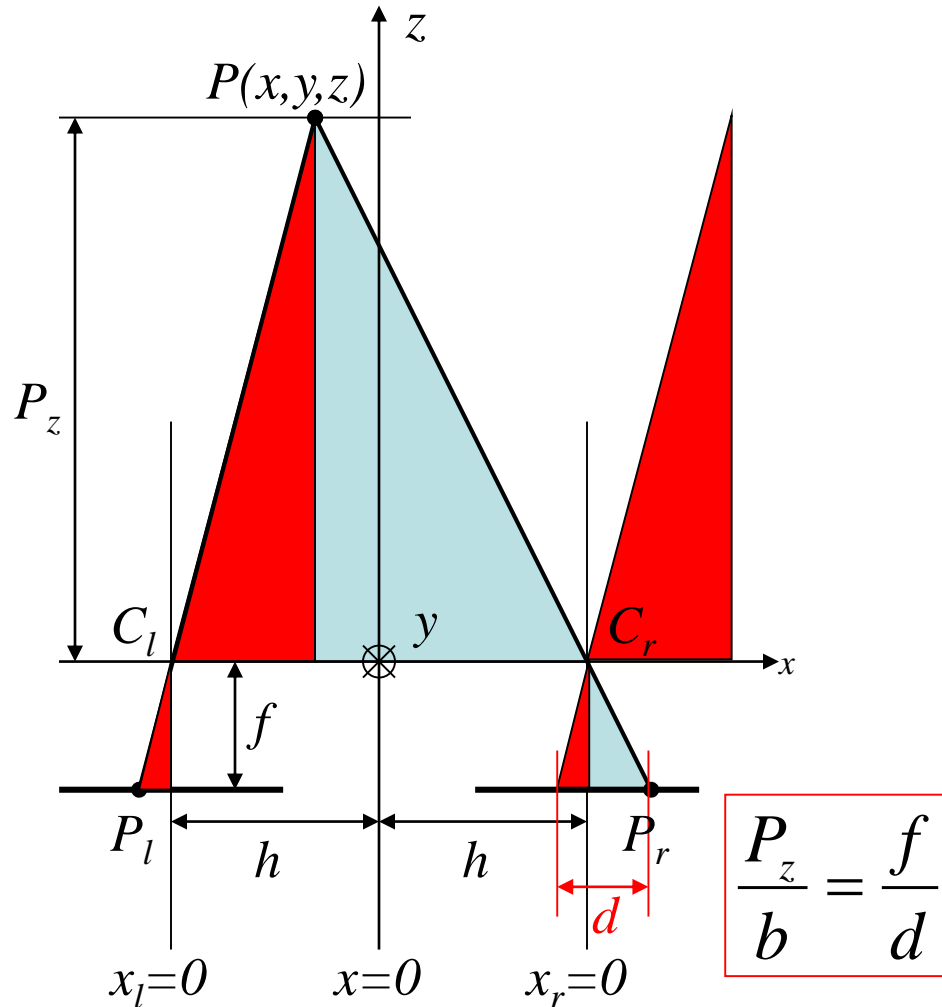
$$y' = y + k_1 \bar{y} r^2 + k_2 \bar{y} r^4 + k_3 \bar{y} r^6 + (t_1 (2\bar{y}^2 + r^2) + 2t_2 \bar{x} \bar{y}) (1 + t_3 r^2)$$

# Was kann man mit einer kalibrierten Kamera messen?

- Richtungen von Sehstrahlen, in Kamerakoordinaten, relativ zur Hauptachse: Dreieck  $C, p, (u_0, v_0)$
- Winkel zwischen Sehstrahlen: Dreieck  $C, p_a, p_b$
- Bei **bekannter Szene**: Pose der Kamera (äußere Orientierung)



# Two cameras: Stereo Reconstruction



Elementary stereo geometry in “canonical configuration”

$2 h \dots$  “baseline”  $b \rightarrow$  *Stereobasis*

$P_r - P_l \dots$  “disparity”  $d \rightarrow$  *Disparität*

There is just column disparity

Depth computation:

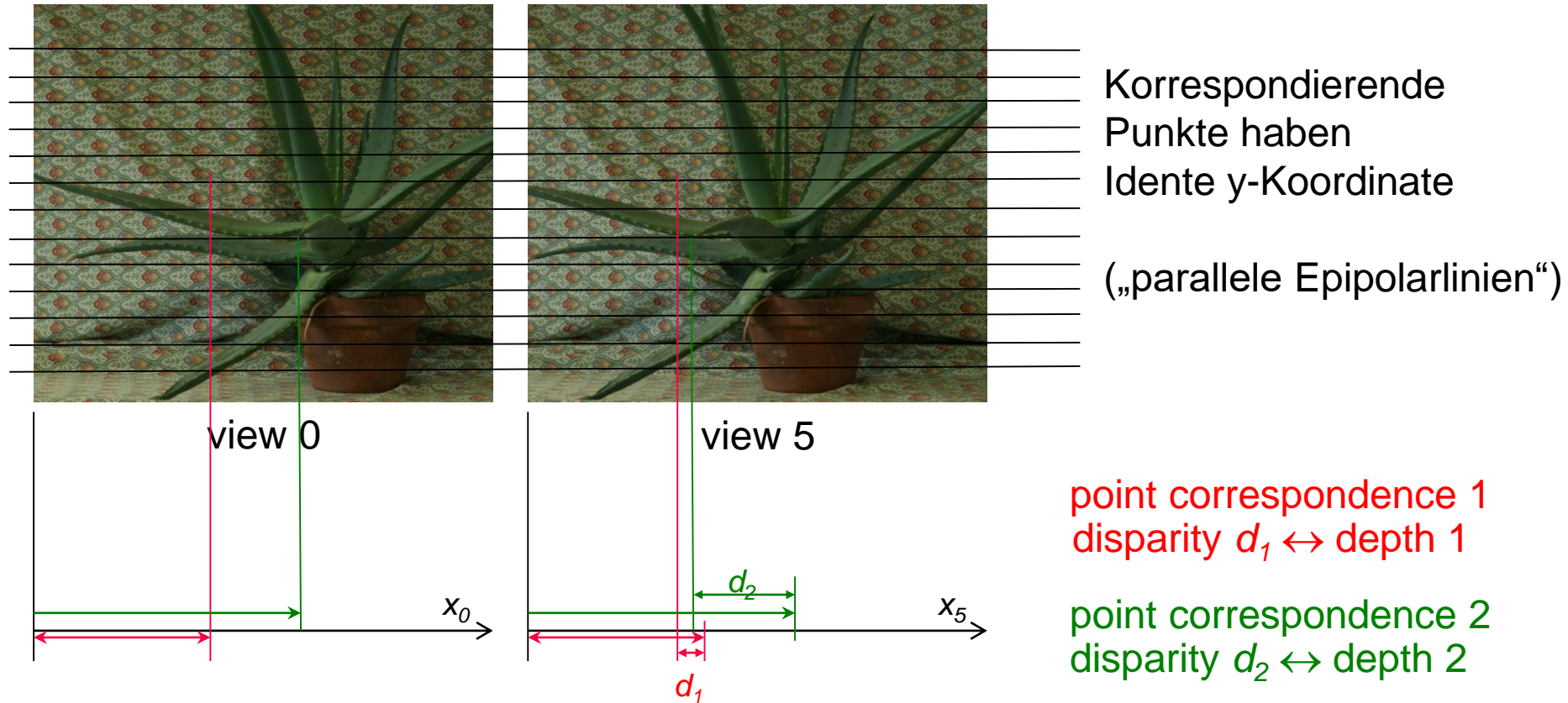
$$P_z = \frac{bf}{d}$$

$\rightarrow$  “Normalfall” des Stereo:

2 Kameras, gleiche Brennweite  $f$ , Stereobasis  $b$ , parallele Blickrichtung

# Canonical Stereo Configuration (1)

Examples taken from <http://vision.middlebury.edu/stereo> → visit the site!  
 Aloe, exposure 1, view0, view5, disp5



# Canonical Stereo Configuration (2)

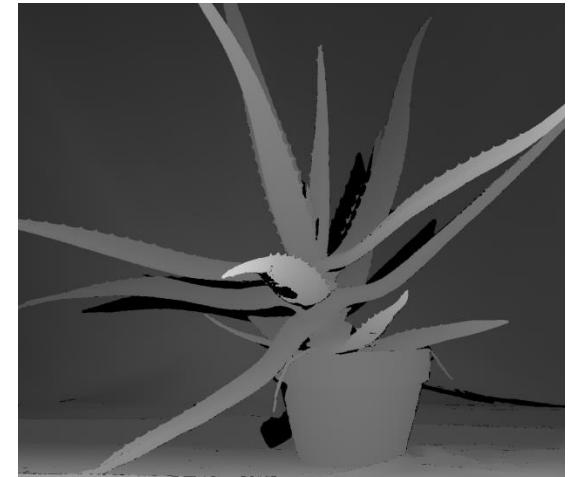
Examples taken from <http://vision.middlebury.edu/stereo> → visit the site!  
 Aloe, exposure 1, view0, view5, disp5



view 0



view 5



disp 5

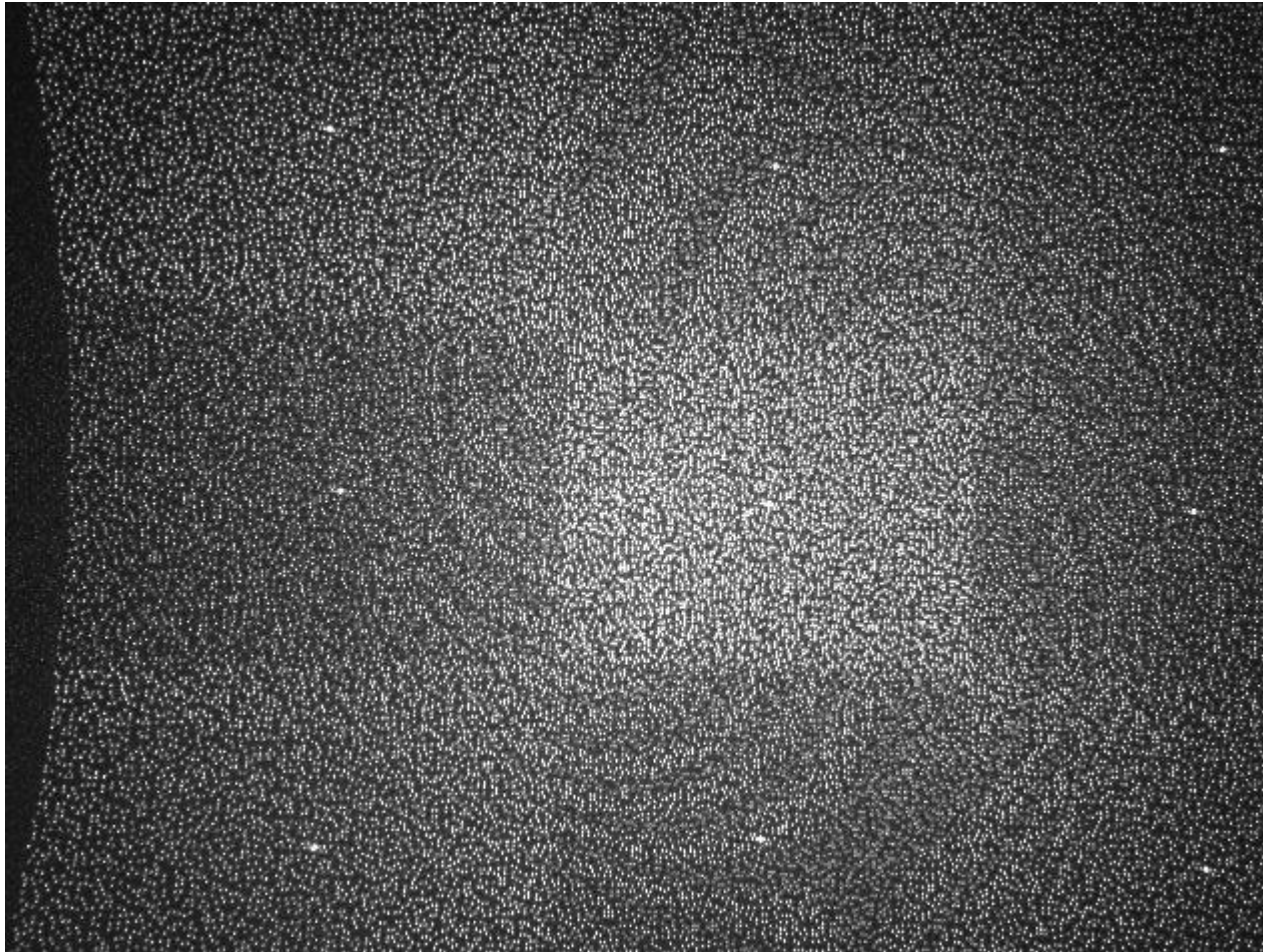
“ground truth” obtained by laser scanner, rendered to a “disp 5” disparity image  
 Larger disparities ↔ higher intensities



# Kinect – Demo

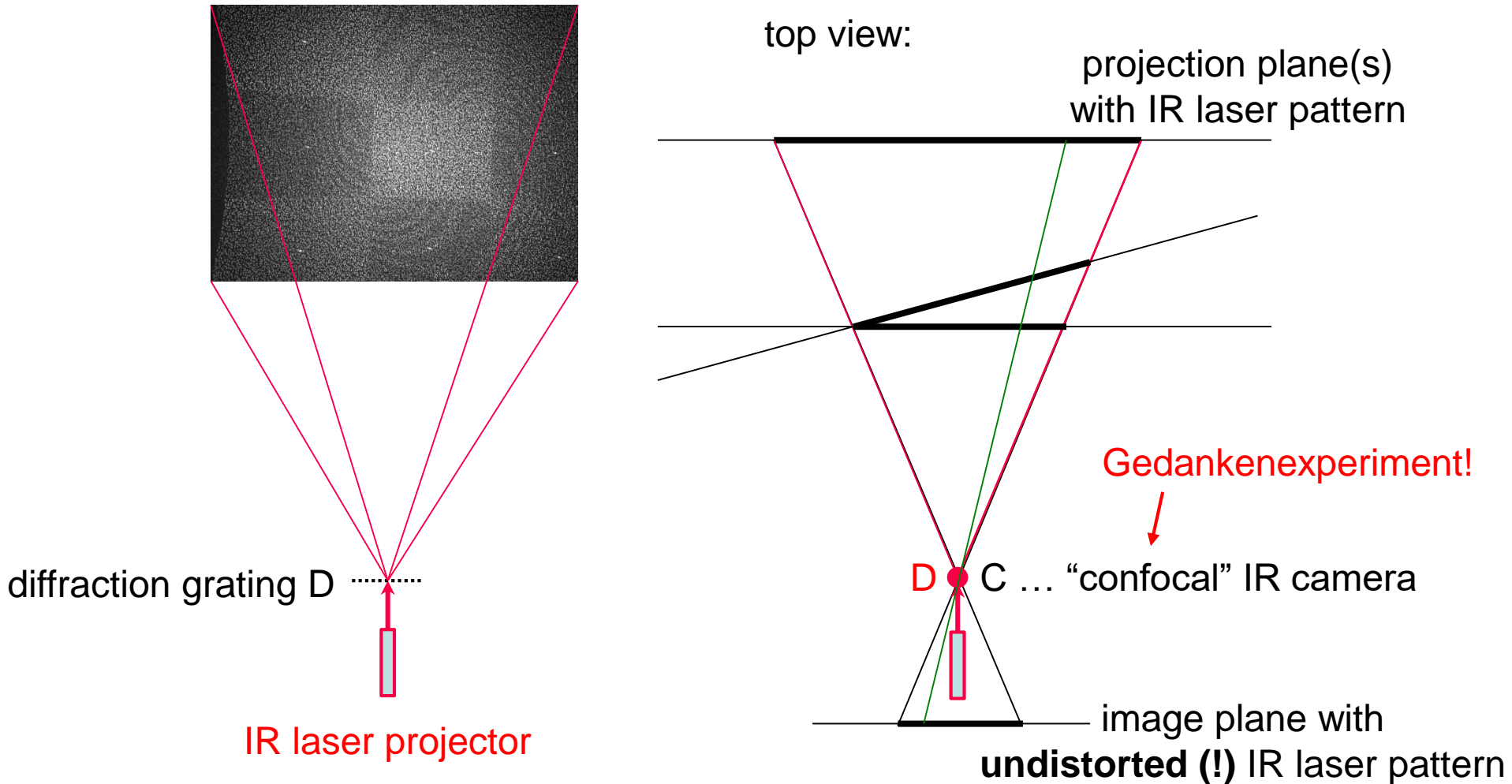


# Kinect Projector/IRCamera $\leftrightarrow$ Stereo Pair in Canonical Configuration

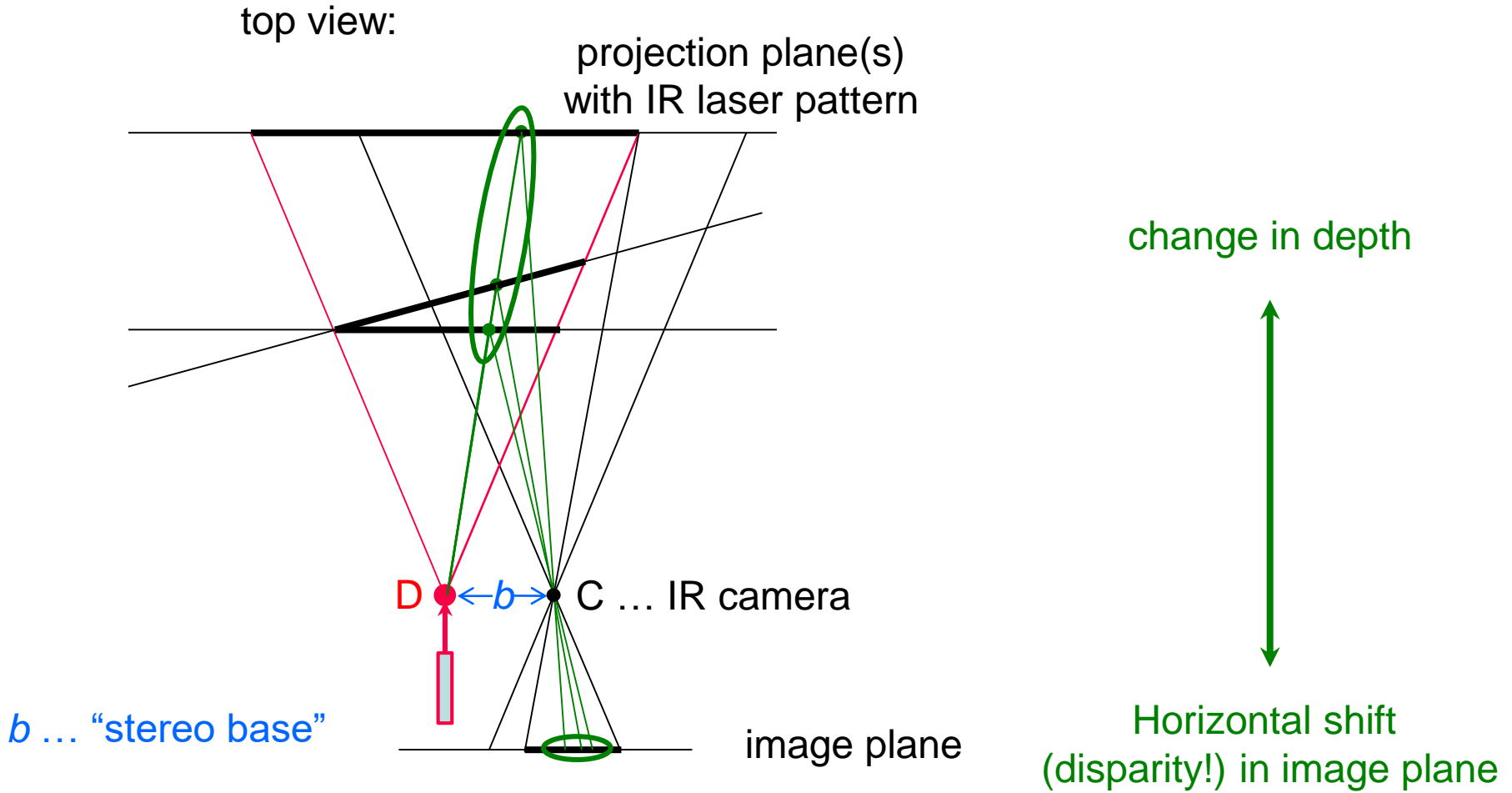


Pattern perceived by IR camera:  
undistorted, but translated dependent on the depth

# Kinect Projector/IRCamera ↔ Stereo Pair in Canonical Configuration (2)



# → Kinect Projector/IRCamera in “Canonical Configuration”



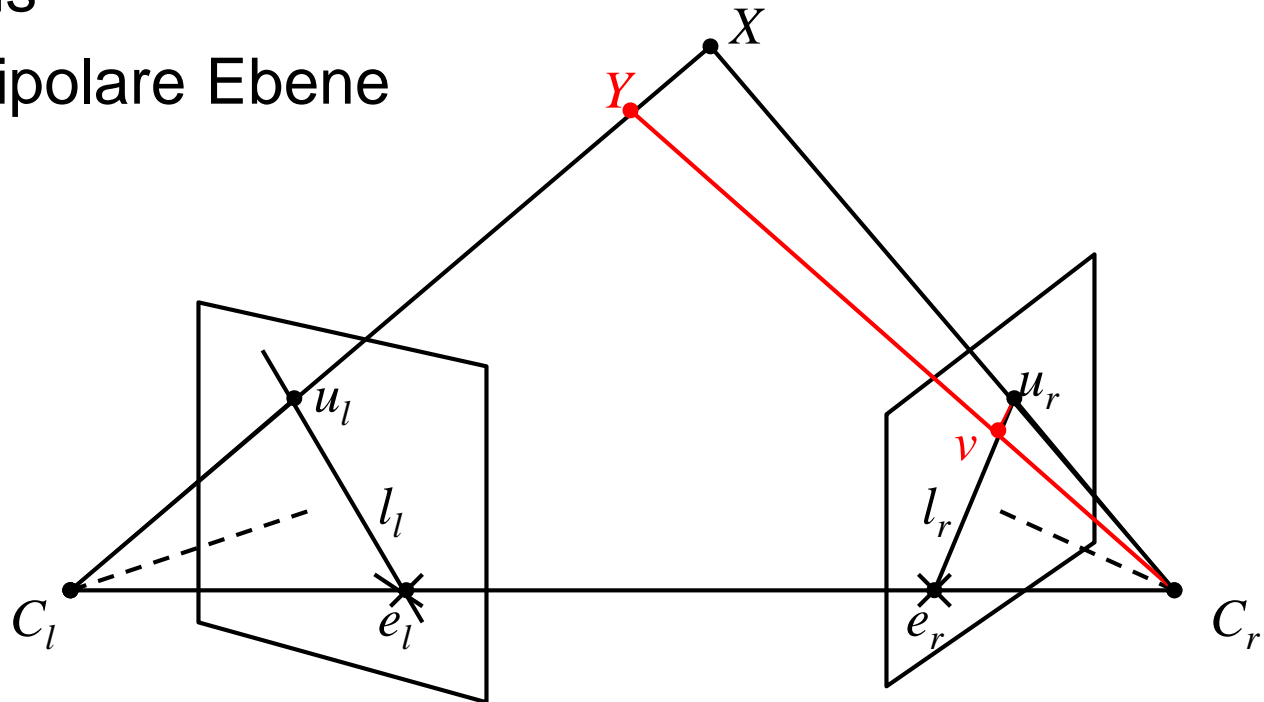
# Allgemeine Stereo-Konfiguration: „Epipolare Geometrie“

$e$  ... Epipol

$l$  ... epipolare Gerade:  $u_l \leftrightarrow l_r$ ,  $u_r \leftrightarrow l_l$

$C_l C_r$  ... Basis

$C_l C_r X$  ... epipolare Ebene



# Messen optischer Größen

## Messen aus Bildern

### Übersicht

Optische Strahlung, Sensorik

Geometrie, Photogrammetrie ✓

- Kamerakalibrierung
- Stereo

Menschliche Wahrnehmung

Digitale Bildanalyse

- Digitales Rasterbild, Kenngrößen
- Bildverarbeitungsoperationen, Segmentation
- Salient point detection + description