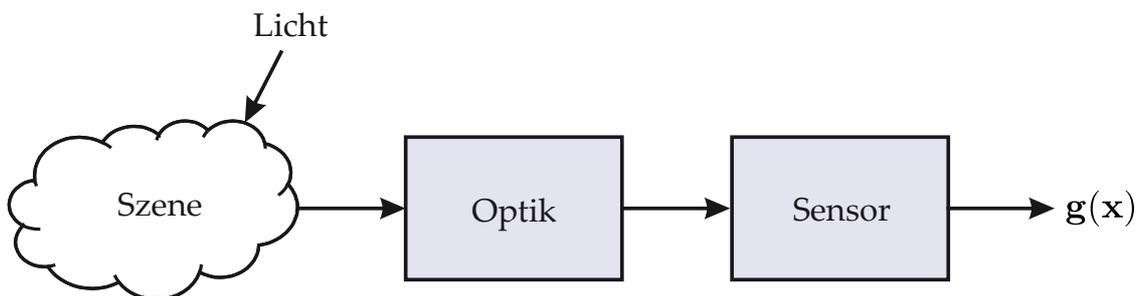


6. Sensoren zur Bildgewinnung

6. Sensoren zur Bildgewinnung

Ziel

- Gewinnung von Bildern (allgemeiner: von Signalen) $g(\mathbf{x})$ über dem Ort \mathbf{x}



$$g(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} g_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ g_Q(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^Q, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$$

$g(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^Q$ Vektorielles Bild, Q : Zahl der „Farben“

Elemente der Bildgewinnung

- **Abtastapertur:** erfasst ein einzelnes Pixel und ignoriert den Rest des Bildes (legt Pixelgröße fest)
 - **Scan-Mechanismus:** bewegt die Abtastapertur in einem festgelegten Muster über das Bild, erlaubt den Zugriff auf die verschiedenen Pixel (legt Pixelabstände fest)
 - **Lichtsensor:** misst die Bestrahlungsstärke durch die Abtastapertur für jedes Pixel und liefert gewöhnlich ein elektrisches Ausgangssignal (Beispiele: Photodioden, Phototransistoren, CCD- und CMOS-Sensoren)
 - **Quantisierer (A/D-Umsetzer):** nimmt eine Diskretisierung der Bildwerte (z. B. Grau- oder Farbwerte) vor
 - **Speicher:** hält die Bildwerte fest und stellt sie für die weitere Bearbeitung bereit
- }
- meist in der **Kamera** realisiert
- }
- oft durch sog. **Frame-Grabber** realisiert

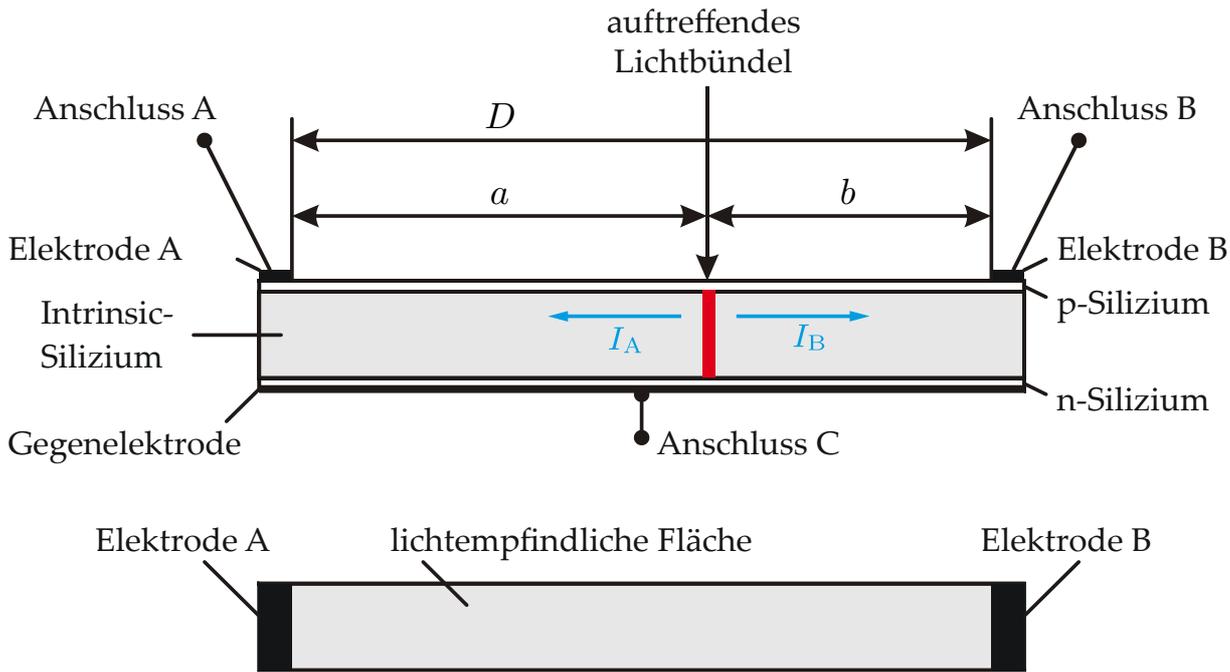
6.1 Punkt-, Zeilen- und Flächensensoren

Spezialfälle:

- $Q = 1$: **Einkanalbild**
 - $g(\mathbf{x}) = \text{Grauwert}(\mathbf{x})$ (Schwarzweißkamera)
 - $g(\mathbf{x}) = \text{Höhe}(\mathbf{x})$ (Topographie, Relief): „2½D-Bild“
- $Q = 3$: **RGB-Farbbild**
 - $g_1(\mathbf{x}) = \text{Rot}(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}) = \text{Grün}(\mathbf{x}), g_3(\mathbf{x}) = \text{Blau}(\mathbf{x})$
- $Q > 3$: **Multi-/Hyperspektralbild** (z. B. durch Hinzunahme nicht sichtbarer Spektralbereiche), **RGB-D-Bild** (Kinect)

Dimension des Sensors	Beispiel	Scanvorgang
0-D (punktförmig)	Photodiode	2-D zeitsequentielle Punktabtastung
1-D (linienförmig)	CCD-Zeilensensor, Photodiodenzeile	1-D zeitsequentielle Linienabtastung
2-D (flächig)	CCD-Chip, CMOS-Bildsensor	0-D simultane Flächenerfassung

- Sensor zur 1D-/2D-Messung des Ortes eines einfallenden Lichtbündels



Prinzipaufbau eines optoelektronischen Positionsdetektors (PSD)

6.5 PSD-Sensoren

- Auftreffender Lichtstrahl erzeugt Ladungsträgerpaare, die durch das Feld der Vorspannung abgesaugt werden und einen geteilten Strom erzeugen:

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{R_B}{R_A} = \frac{b}{a} = \frac{D - a}{a} = \frac{D}{a} - 1$$

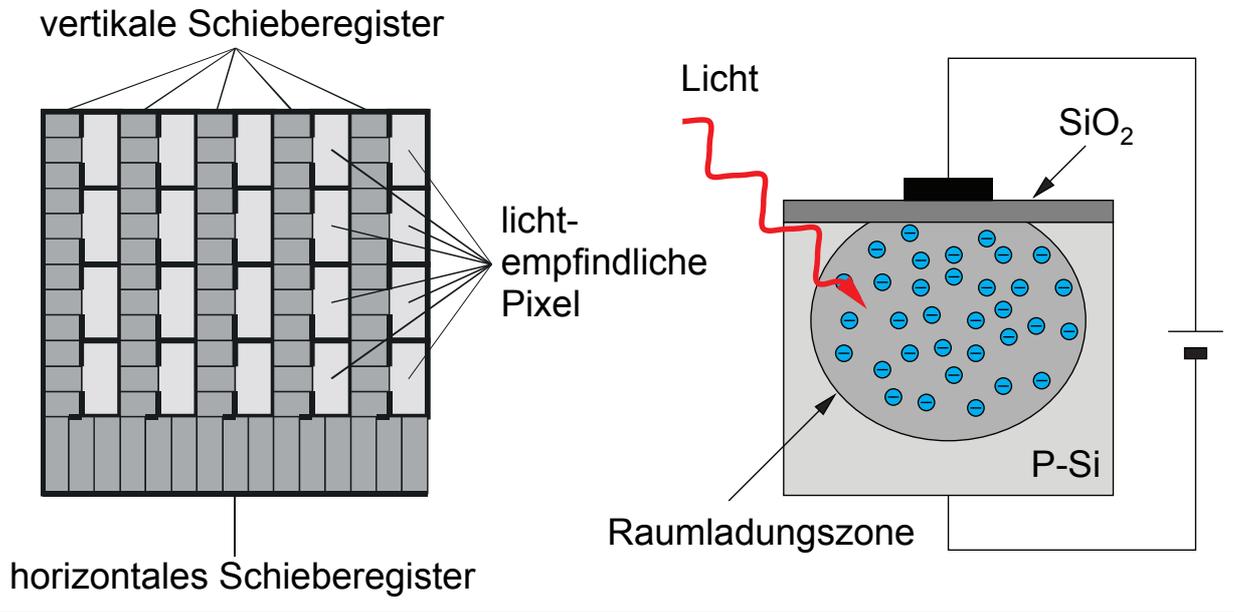
$$\frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} = \frac{\frac{I_A}{I_B} - 1}{\frac{I_A}{I_B} + 1} = \frac{\frac{D}{a} - 2}{\frac{D}{a}} = 1 - \frac{2}{D} \cdot a$$

kann sehr einfach in Analogtechnik realisiert werden

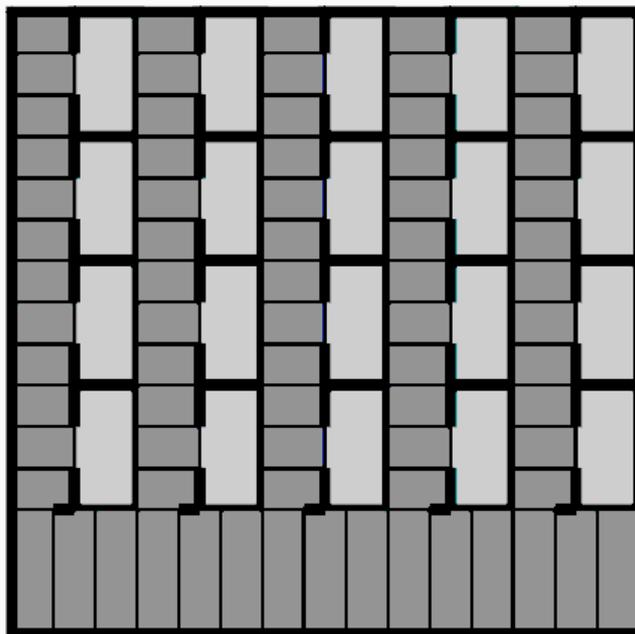
$$a = D \cdot \frac{I_B}{I_A + I_B}$$

- Wichtigste Sensoren für Bildverarbeitung: CCD-/CMOS-Flächensensoren
- **Beispiele:** Interline-Transfer-Sensor, Full-Frame-Sensor

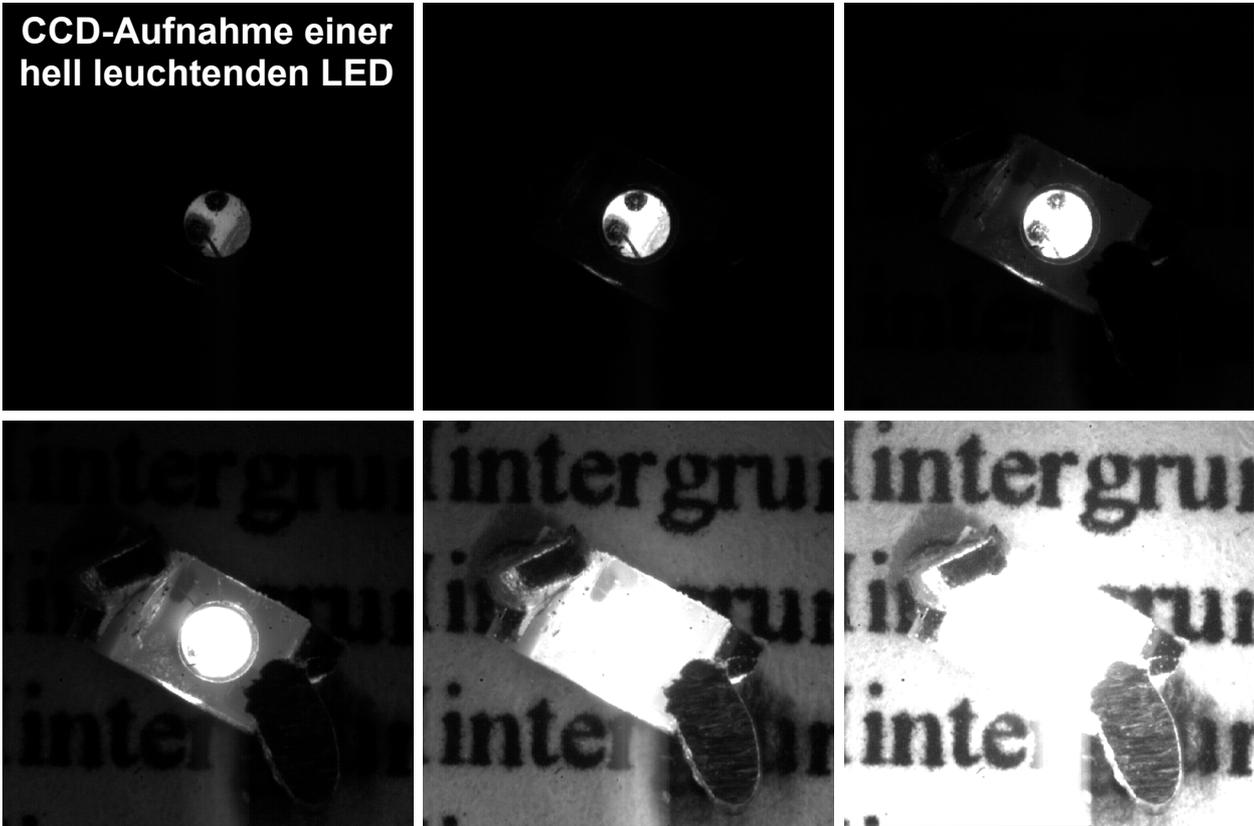
Aufbau eines Interline-Transfer-Sensors



Wirkungsweise eines Interline-Transfer-Sensors



CCD-Aufnahme einer hell leuchtenden LED

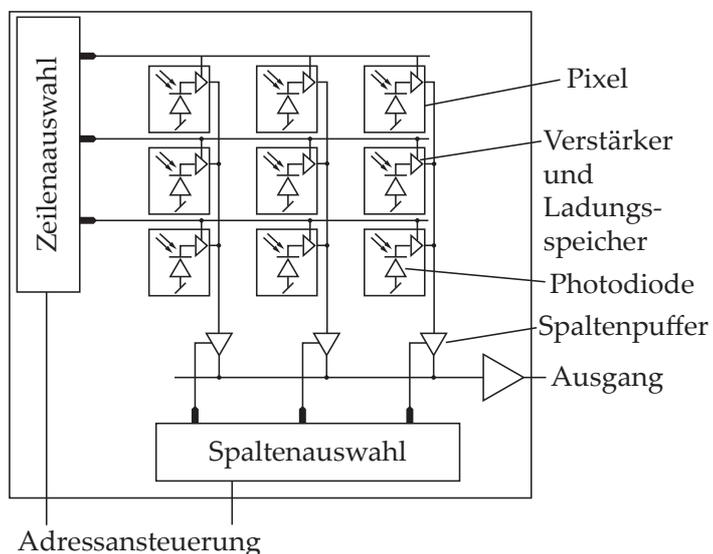


6.7 CMOS-Sensoren

- Durch die Verwendung desselben Herstellungsprozesses lässt sich Steuer- und Verarbeitungselektronik auf dem Sensorchip integrieren
- Detektionsprinzip von Photonen wie bei CCD-Sensoren
- Ladungsverstärker als erste Verarbeitungsstufe im Pixel
- Pixelzugriff frei wählbar; keine Schieberegister

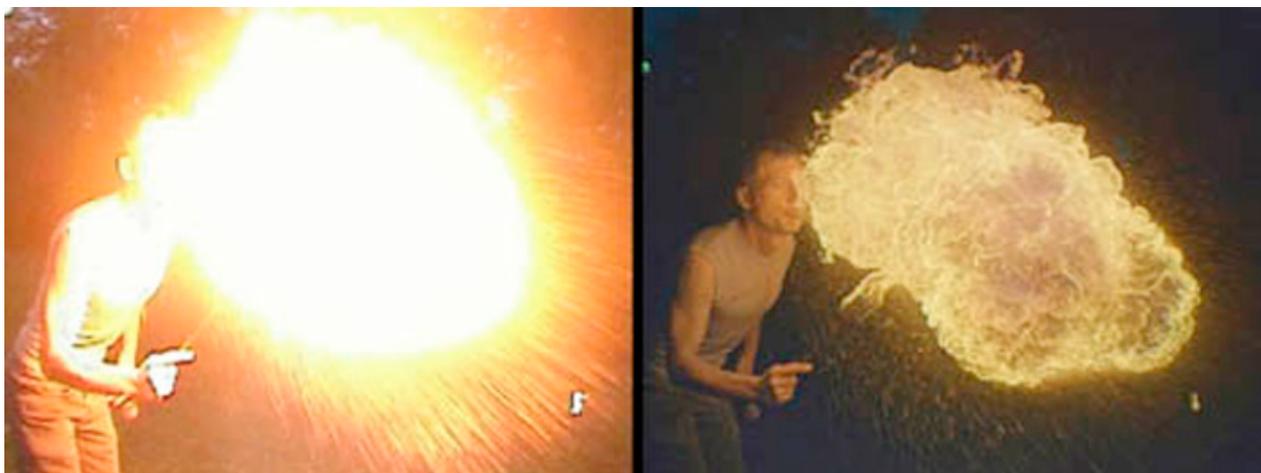
Vergleich mit CCD-Sensoren

- + Geringere Baugröße
- + Flexibleres Auslesen (z. B. bei Bildregionen)
- + Geringerer Stromverbrauch
- + Kein *Smear*, kaum *Blooming*
- Empfindlichkeitsunterschiede bei den Pixeln
- Geringerer Füllfaktor



HDRC-Sensoren

- CMOS-Technologie erlaubt Realisierung von Sensoren mit einem **erhöhtem Dynamikbereich** (*high dynamic range CMOS*, HDRC)
- Beispiele von Einsatzgebieten:
 - Außenaufnahmen, wo die Lichtintensität zwischen Sonneneinstrahlung und Schlagschatten stark variieren kann, oder bei Gegenlicht
 - In-situ-Überwachung von Schweißvorgängen
- Zusammenhang zwischen der Anzahl absorbierter Photonen und dem Ausgangssignal des Sensors **logarithmisch** (vgl. Weber-Fechner-Gesetz)
- Kennlinie wird erreicht, indem man den durch Licht induzierten Photostrom über einen **pn-Übergang** in Durchlassrichtung abfließen lässt: Da bei einer Diode der Strom exponentiell mit der Spannung wächst, hängt die Spannung logarithmisch mit dem Photostrom zusammen
- HDRC-Sensoren erreichen typischerweise eine Dynamik von ca. 120 dB



CCD-Sensor

HDRC-Sensor

Quelle: Institut für Mikroelektronik Stuttgart

Vorzüge von CCD- und CMOS-Sensoren

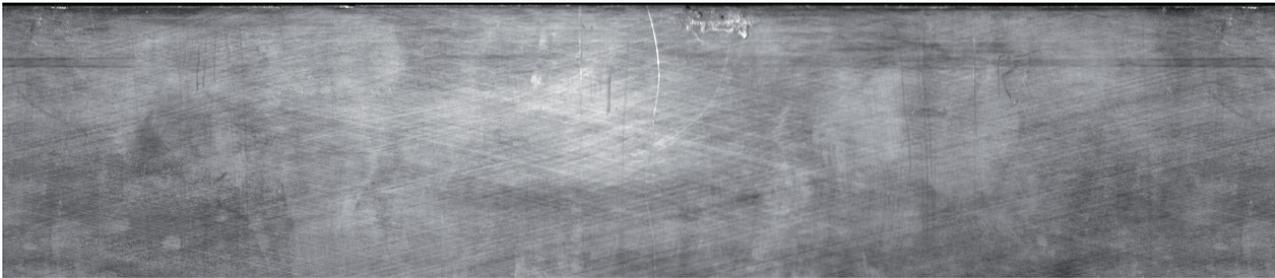
- präzise Geometrie der lichtempfindlichen Bereiche (Maßverkörperung)
- elektronischer Shutter, d. h. Belichtungszeit elektronisch einstellbar
→ extrem kurze Belichtungszeiten möglich!
- hohe Empfindlichkeit und Dynamik (ca. 10^3) – bei logarithmischen CMOS-Sensoren bis ca. 10^6
- kein Einbrennen bei Überbelichtung
- unempfindlich gegen elektrische und magnetische Felder (im Vergleich zu den früher benutzten Aufnahmeröhren mit Elektronenstrahlen)
- mechanisch robust
- langlebig
- klein
- leicht
- preiswert

Gängige Daten kommerzieller CCD- und CMOS-Kameras

Pixelanzahl	$640 \times 480 - 4\,800 \times 3\,200$
Pixelgröße	ca. $2 \times 2 \mu\text{m}^2 - 10 \times 10 \mu\text{m}^2$
elektrische Verschlusszeit (Belichtungszeit)	ca. $10 \mu\text{s}$ – mehrere Sekunden (Langzeitbelichtung)
Bildrate (sinkt mit wachsender Bildgröße)	ca. 3 Hz – 200 Hz
SNR	50 dB – 60 dB

Eigenschaften

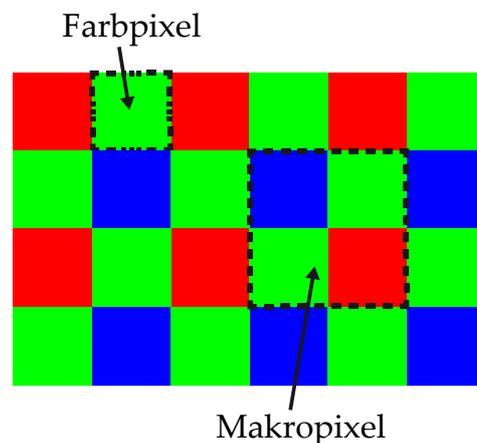
- Nur eine Zeile photosensitiver Elemente („x-Richtung“)
- Scanbewegung („y-Richtung“) erfolgt durch Relativbewegung von Objekt und Sensor (z. B. bei Beobachtung von Transportbändern)
- Höhere Auflösungen in x-Richtung möglich (z. Zt. max. 16.384 Pixel/Zeile)
- Einfachere gleichmäßige Beleuchtung des Bildes (da 1-D)



Aufnahme einer Zylinderwand eines Verbrennungsmotors durch einen Scanvorgang mit einer CCD-Zeilenkamera

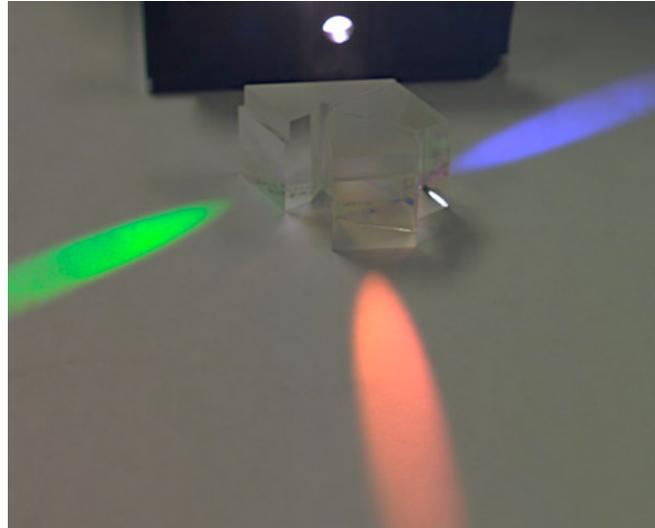
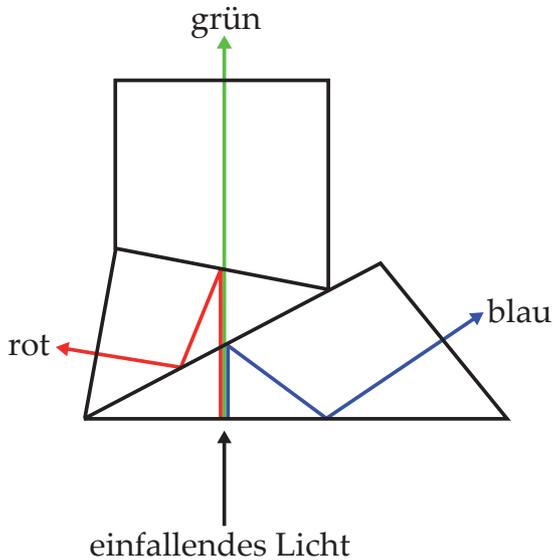
6.9 Farbsensoren und Farbkameras

- Übliche Farbkameras liefern für jedes Pixel die Farben Rot, Grün & Blau
- Oft liegen Farbfilter vor dem Chip, die gewisse Grundfarben durchlassen
- **Bayer-Matrix***: Zusammenfassung von 4 Pixeln zu einem Makropixel (menschliches Auge ist für Grün empfindlicher)
- Die anderen Kanäle aus benachbarten Pixeln interpoliert (*Demosaicing*)



*) Bryce E. Bayer (1929–2012), US-amerikanischer Physiker

- Hochwertige Farbkameras verwenden **drei Chips** für die Aufnahme
- Strahlteiler (Prismensystem) spaltet Licht in drei Farbkomponenten auf
- Dichroitische Filter spiegeln manche & lassen übrige Wellenlängen durch
- Eine Interpolation ist nicht notwendig



http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Color_Separation_Prism.jpg

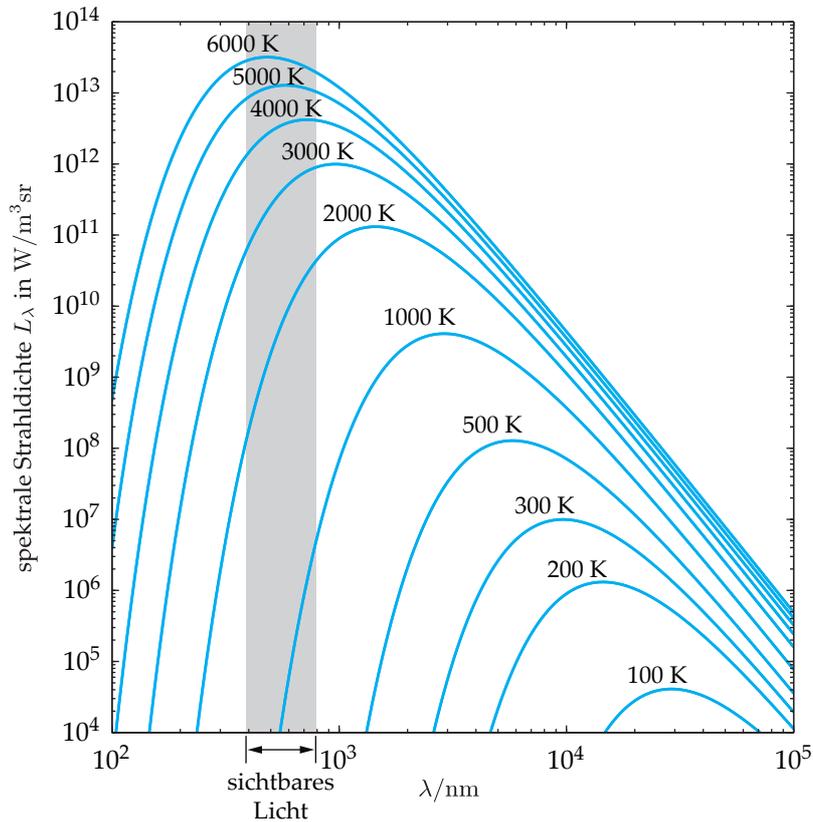
6.10 Infrarotkameras

- **Infrarotspektrum** lässt sich nochmals in mehrere Bänder unterteilen:

Bezeichnung	Abkürzung	λ in μm
nahes Infrarot (<i>near infrared</i>)	NIR	0,75 – 1,4
kurzwelliges Infrarot (<i>short-wavelength infrared</i>)	SWIR	1,4 – 3,0
mittleres Infrarot (<i>medium-wavelength infrared</i>)	MWIR	3,0 – 8,0
langwelliges Infrarot (<i>long-wavelength infrared</i>)	LWIR	8,0 – 15,0
fernes Infrarot (<i>far infrared</i>)	FIR	15,0 – 1000

- **NIR-Spektrum** mit Silizium-Sensoren (200–1100 nm) erfassbar
- Für größere Wellenlängen andere Detektoren erforderlich:
 - Bolometer-Kameras (Arrays von NTC-Widerstandsthermometern)
 - Quantendetektoren auf Halbleiter-Basis
- Fernes Infrarot geht in den **Terahertz-Bereich** über (frühere „THz-Lücke“)
- Wichtige Anwendung: Messung der Temperaturverteilung mit „Wärmebildkameras“ im MWIR und LWIR (**Planck'sches Strahlungsgesetz**, Kap. 2)
 - Aus einem Infrarotbild lässt sich bei bekannten Materialeigenschaften die örtliche Temperaturverteilung von Objekten berechnen

6.10 Infrarotkameras



Spektrum schwarzer Strahler nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz

6.10 Infrarotkameras

Bsp.: VRU-Klassifikation in LWIR-Bildern



VRU: vulnerable road users (etwa: nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer)

- Fahrradfahrer senkrecht zur Kamera
- Fahrradfahrer parallel zur Kamera
- Fußgänger

- **Quantenwirkungsgrad** (Quantenausbeute): Verhältnis von der Anzahl der erzeugten Elektronen zur Anzahl der auftreffenden Photonen
- **Sättigungsladung**: maximale Anzahl der Elektronen, die ein Pixel sammeln kann
- **Füllfaktor**: Anteil der lichtempfindlichen Bereiche an der Chipfläche
- **Rauschverhalten** (Verhältnis des Ausgangssignals zur Standardabweichung) – Rauschen durch Ladungstransport und Auslesen bedingt
- **Dunkelstrom** (Signal des unbeleuchteten Bildsensors): Ideale Sensoren würden ohne Beleuchtung Nullsignal liefern, aufgrund von thermischem Rauschen jedoch nicht – Dunkelstrom durch Kühlung verringerbbar
- **Dynamikbereich**: Verhältnis von maximalem Ausgangssignal zur Standardabweichung des Dunkelstroms
- **Homogenität**: Infolge von Fertigungstoleranzen weisen die Pixel eines Sensors unterschiedliches Verstärkungs- und Rauschverhalten auf (*fixed-pattern noise*)

- Unter Umständen können störende **Artefakte** im Bild auftreten:
 - **Blooming**: Ladung fließt aus überbelichteten Pixeln in benachbarte Pixel ab, die somit ein zu hohes Signal liefern
 - **Smear** sind Streifen im Bild, die im Zusammenhang mit Schieberegistern der CCD-Chips entstehen
- **Adressierbarkeit**:
 - Manche Sensoren unterstützen ein selektives Auslesen bestimmter Bildregionen (ROI) mit erhöhter Auslesefrequenz
 - Bei anderen Sensoren können benachbarte Pixel auf Ladungsebene zusammengefasst werden: ein unterabgetastetes Bild resultiert
- **Energieverbrauch**

Vergleich von CMOS- und CCD-Sensoren

- **CMOS-Sensoren** sind im Vorteil beim Energieverbrauch, bei der Adressierbarkeit und beim Dynamikbereich (insbesondere die HDR- Sensoren) und sind weniger anfällig für Blooming und Smear
- **CCD-Chips** haben eine höhere Homogenität und geringeren Dunkelstrom