03-05-H
-709.53

Echtzeitbildverarbeitung (2)

Prof. Dr. Udo Frese

Der Weg des Bildes in den Rechner
Industrieller Ansatz
Schwellwert
Regionenbildung

Was bisher geschah

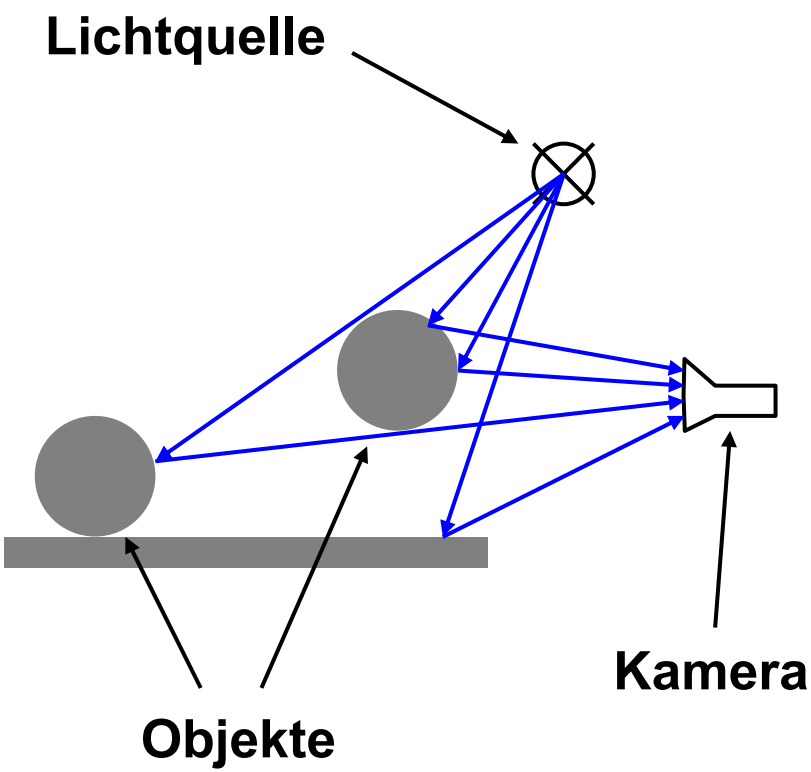
- **Bildverarbeitung ist automatisches Erkennen von Objekten in Bildern mit 2D / 3D Lagebestimmung**
  - „Umkehrproblem zur Computergrafik“ ist keine hilfreiche Sichtweise
  - Schwierig, weil viele „seltsame“ Effekte Bilder beeinflussen
- **Echtzeit bedeutet, so schnell wie der Vorgang der die Daten erzeugt**
  - Echtzeitbildverarbeitung 20ms – 200ms
  - Rechenzeit ist dominante Einschränkung
- **Industrielle Anwendungen**
  - Qualitätskontrolle: Maße, Vollständigkeit, Farbe, Oberfläche
  - Montage: Position von Werkstückteilen, Robotersteuerung
  - Die Lösung ist eine geschickt entworfene Umgebung
- **Forschungsanwendungen**
  - Vielfältig: Navigation, Kartierung, Sportrobotik, Medizin, Virtual Reality

Der Weg des Bildes in den Rechner

Wirkungskette bis zum Bild im Rechner (Normalfall, Monochrom)

- **Beleuchtung sendet Lichtstrahl aus …**
- **… interagiert mit dem Objekt und wird zurückgestrahlt …**
- **… trifft auf das Objektiv …**
- **… wird vom Objektiv auf den CCD Chip abgebildet …**
- **… erzeugt für jeden Pixel eine Spannung prop. zur Lichtmenge.**
- **Spannung wird digitalisiert und üblicherweise 8 Bit konvertiert …**
- **… zum Rechner gesendet …**
- **… in den Speicher geschrieben.**

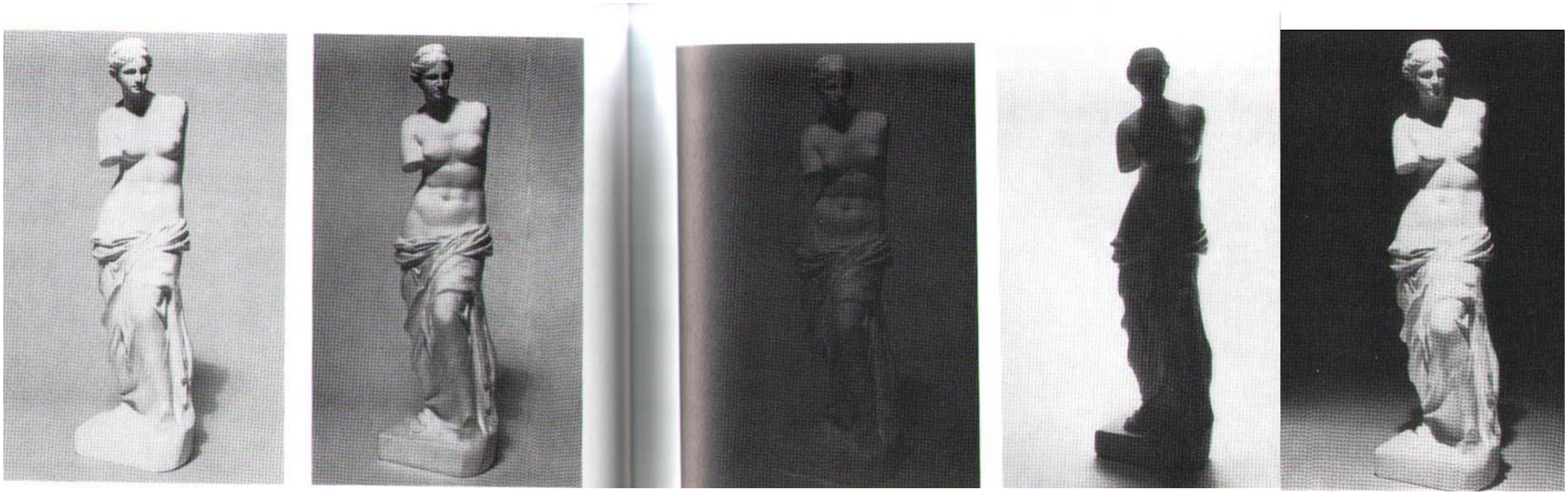
Der Weg des Lichtes



Der normale Weg:

- Licht wird von der Lichtquelle ausgesandt
- Trifft auf das Objekt und wird zurückgeworfen
- Stärke hängt von Oberfläche, Winkel zur Lichtquelle und t.w. Winkel zur Kamera ab
- Lichtstrahl trifft das Objektiv der Kamera

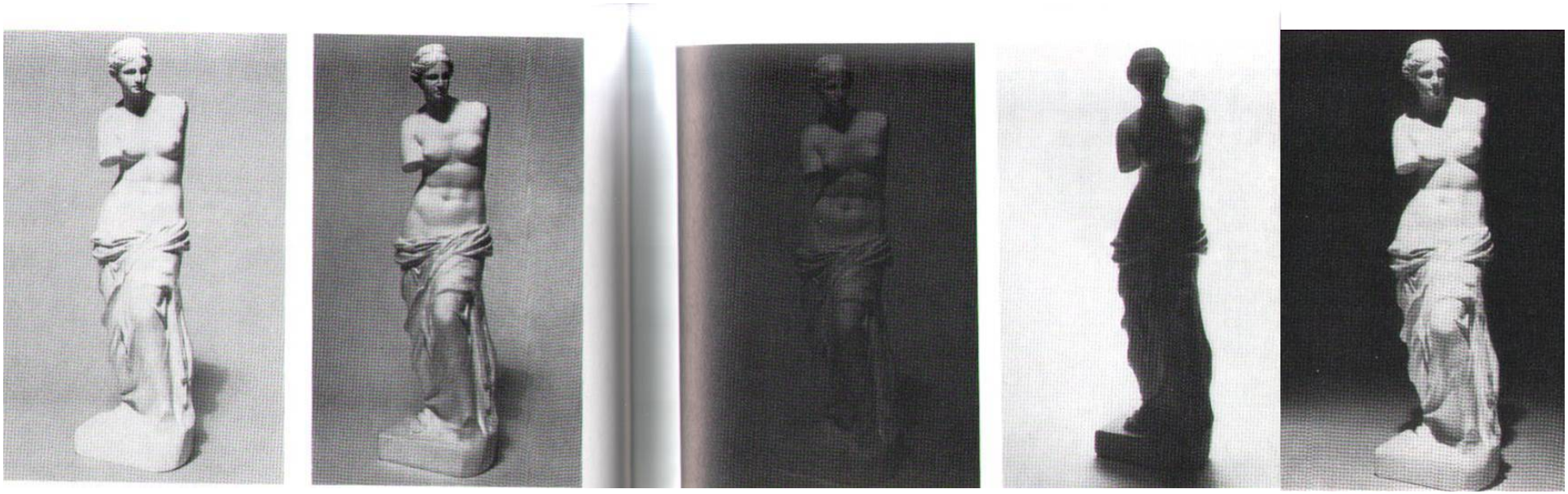
Der Weg des Lichtes



- **Beleuchtung macht einen sehr großen Unterschied**
- **Besonders bei Industriellen Anwendungen:**
  Lieber bessere Beleuchtung als mehr Intelligenz!
- **Frage an das Auditorium: Welche Beleuchtung eignet sich für wofür?**

Quelle: A. Feininger: Die hohe Schule der Fotographie, 1961

Der Weg des Lichtes



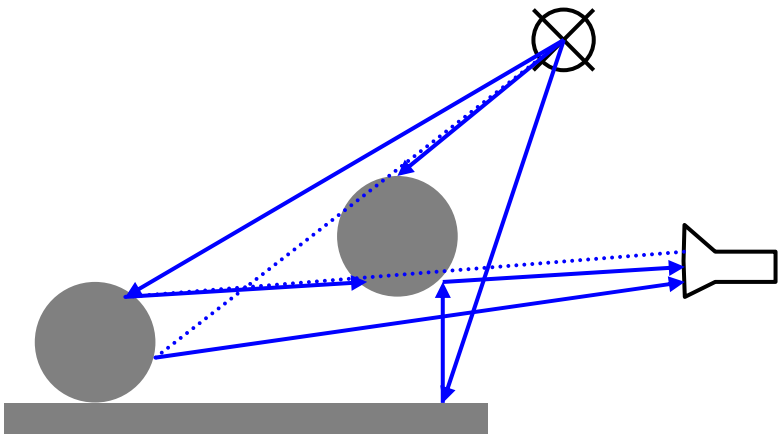
Merkmale auf der Figur

Kontur-segmentierung

- **Frage an das Auditorium: Welche Beleuchtung eignet sich für wofür?**

Quelle: A. Feininger: Die hohe Schule der Fotographie, 1961

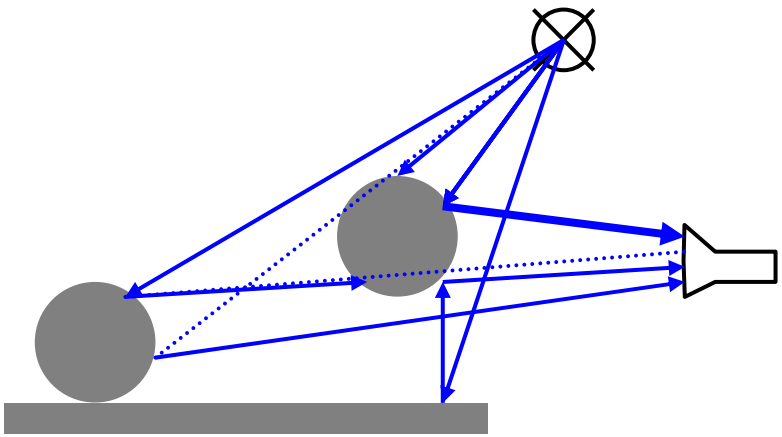
Der Weg des Lichtes



Effekte, die Probleme machen

- **Frage an das Auditorium: Könnt Ihr die skizzierten Effekte benennen?**

Der Weg des Lichtes



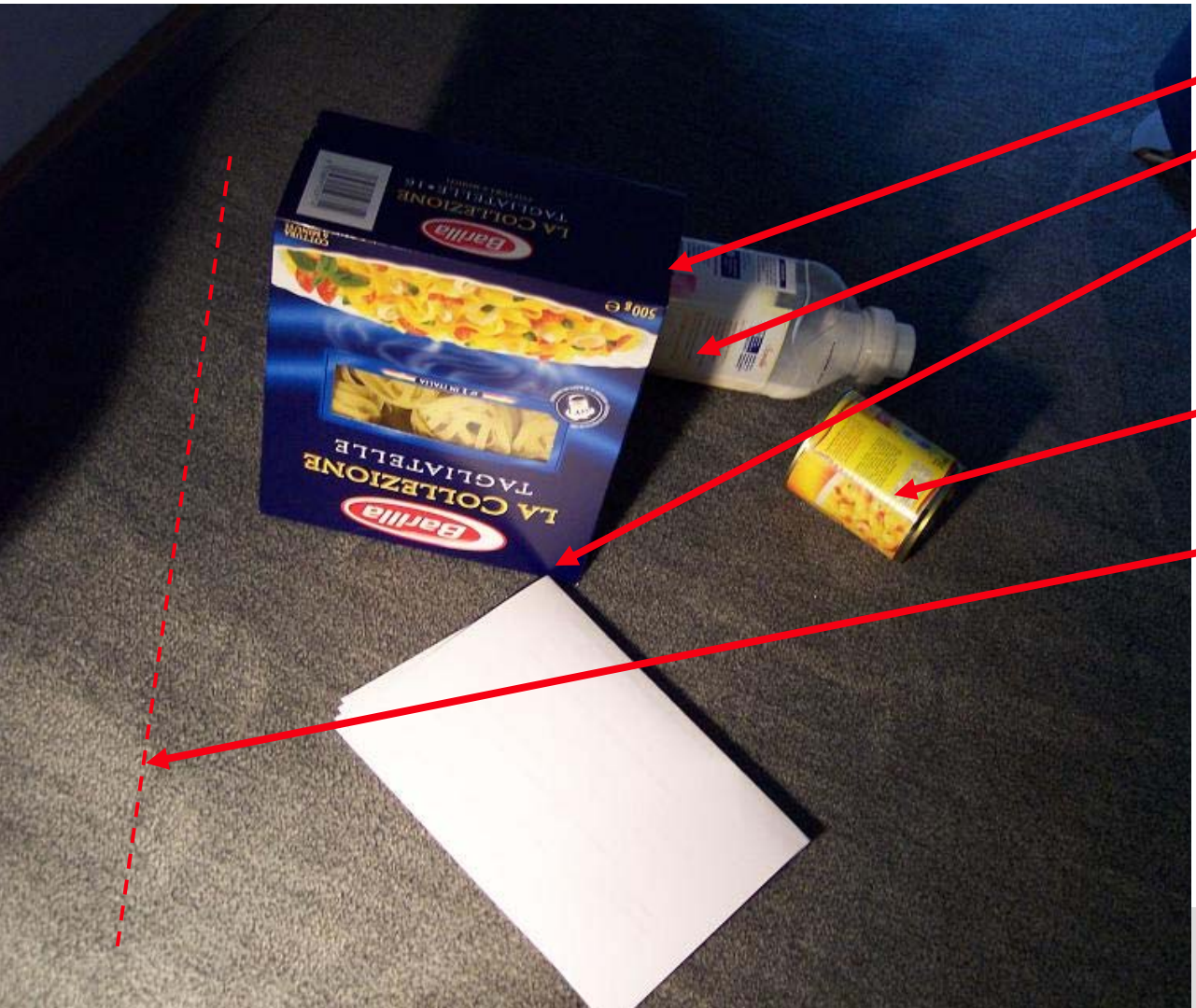
Effekte, die Probleme machen

(an der Lichtquelle v.l.n.r.):

- **Verdeckung**
- **Schatten**
- **Reflexionen**
- **Licht von einem Objekt (meist gespiegelt)**

- **Beleuchtungsgradient (Licht einer Punktquelle ist $\sim r^{-2}$)**

Der Weg des Lichtes



- Verdeckung
- Schatten
- Licht von einem Objekt (meist gespiegelt)
- Reflexionen
- Beleuchtungs-gradient

Der Weg des Lichtes

Frage an das Auditorium: Was tut man gegen…

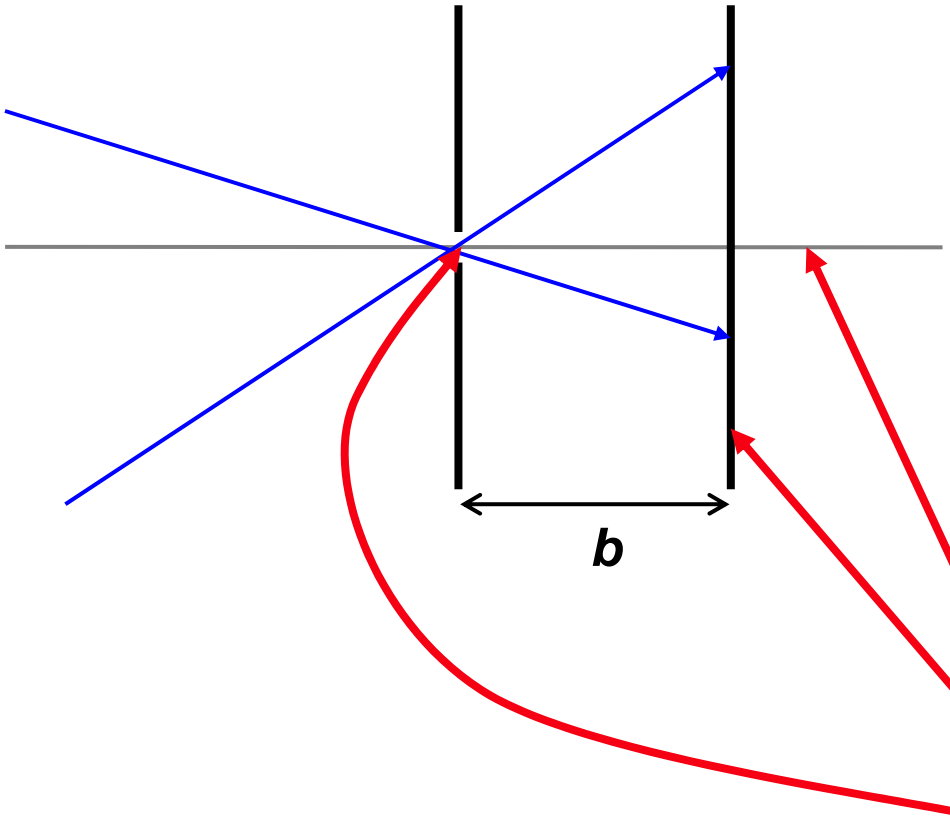
- **Verdeckungen:**
- **Schatten**
- **Reflexionen**
- **Licht von einem Objekt**
- **Beleuchtungsgradient**

Der Weg des Lichtes

Frage an das Auditorium: Was tut man gegen…

- **Verdeckungen:**
  - Bessere Kameraposition; Mehrere Kameras; Objekte besser plazieren
- **Schatten**
  - Licht nah an die Kamera
  - Ausgedehnte Lichtquellen (indirektes Licht, Röhren, Ringlicht, Flächenlicht, Lichtkuppel, LED Licht)
- **Reflexionen**
  - Matte Oberflächen; Licht von besserem Winkel;
  - ggf. Flächenlicht, Lichtkuppel; Polarisationsfilter
- **Licht von einem Objekt**
  - Matte Oberflächen
- **Beleuchtungsgradient**
  - Senkrecht beleuchten; Flächenlicht

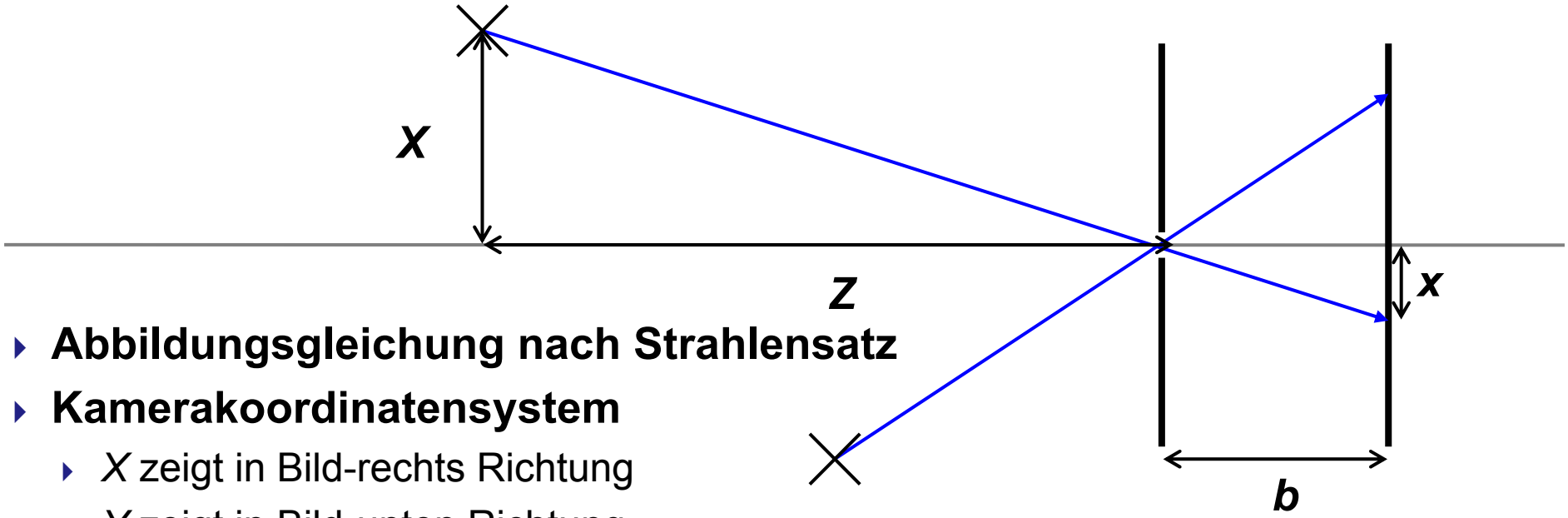
Der Weg des Lichtes



Lochkamera (Camera obscura)

- Lichtstrahlen fallen durch das Loch in der Vorderseite
- Auf der Rückseite entsteht das (umgedrehte) Bild
- definiert abstrakte perspektivische Abbildung
- Abstand ist die Bildweite *b* *(ähnlich Brennweite f)*
- Optische Achse
- Bildebene
- Optisches Zentrum der Kamera

Der Weg des Lichtes



- **Abbildungsgleichung nach Strahlensatz**
- **Kamerakoordinatensystem**
  - *X* zeigt in Bild-rechts Richtung
  - *Y* zeigt in Bild-unten Richtung
  - *Z* zeigt in die Tiefe (optische Achse)
- ***(X, Y, Z)* Koordinaten des abgebildeten Punktes im Kamerasystem**
- ***(x, y)* Koordinaten des Abbildes im *physikalischen* Bild**

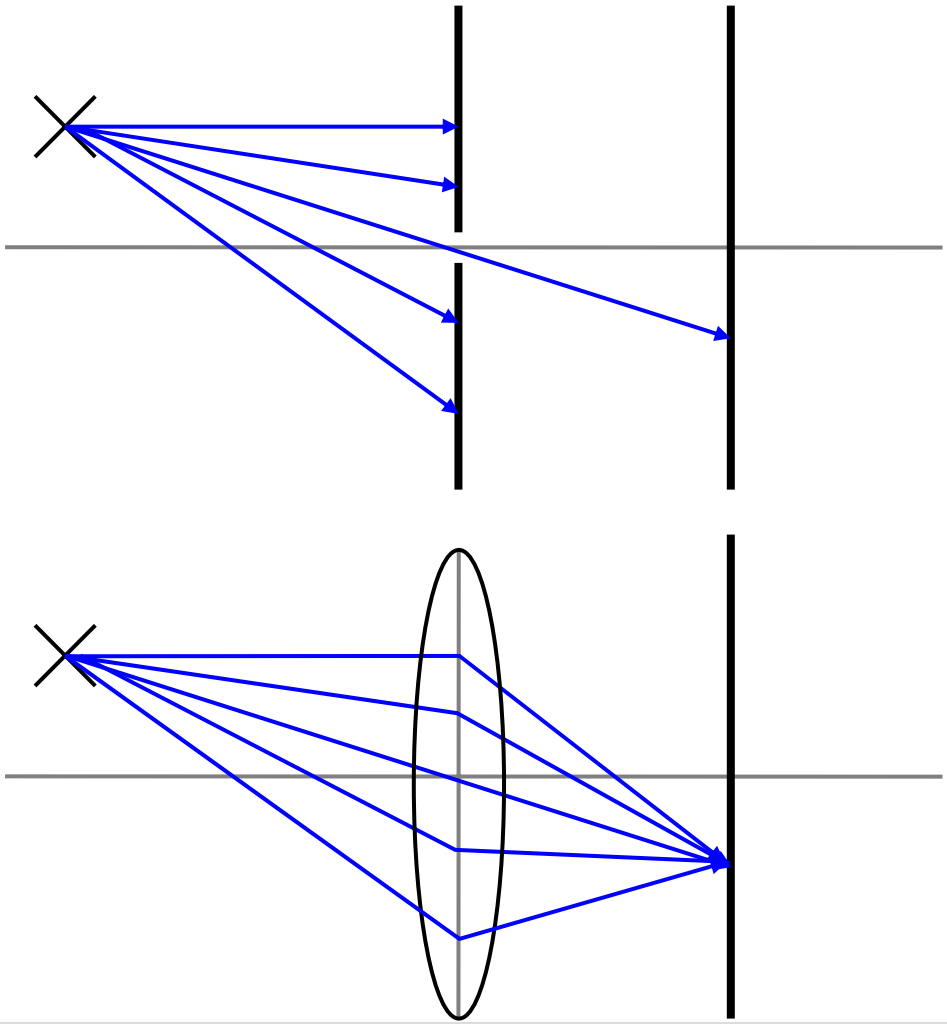
$$x = b\frac{X}{Z} \qquad y = b\frac{Y}{Z}$$

Der Weg des Lichtes

Bild-/ Brennweiten

- **Durch verschiedene Bildweiten kann der Bildausschnitt / Vergrößerung verändert werden**
- **Praktisch: Objektive mit verschiedenen Brennweiten oder Zoomobjektiv**
- **Dieselbe Szene mit ≈ 80°, 45°, 15° Öffnungswinkel**
- **Mensch: ≈ 170°**
- **Verzerrungen bei über 45°**

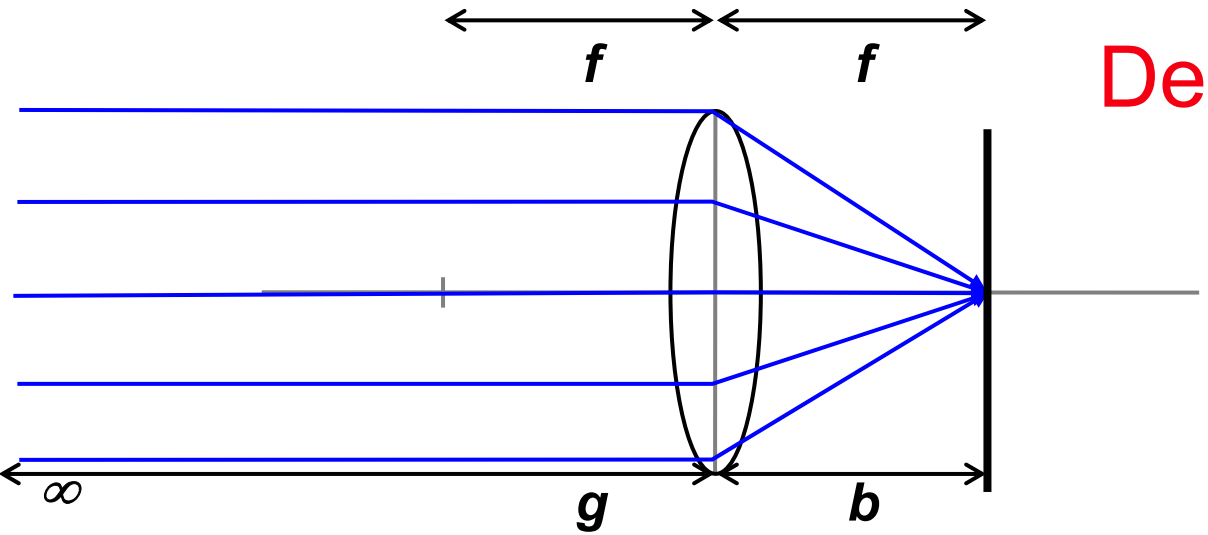
Der Weg des Lichtes

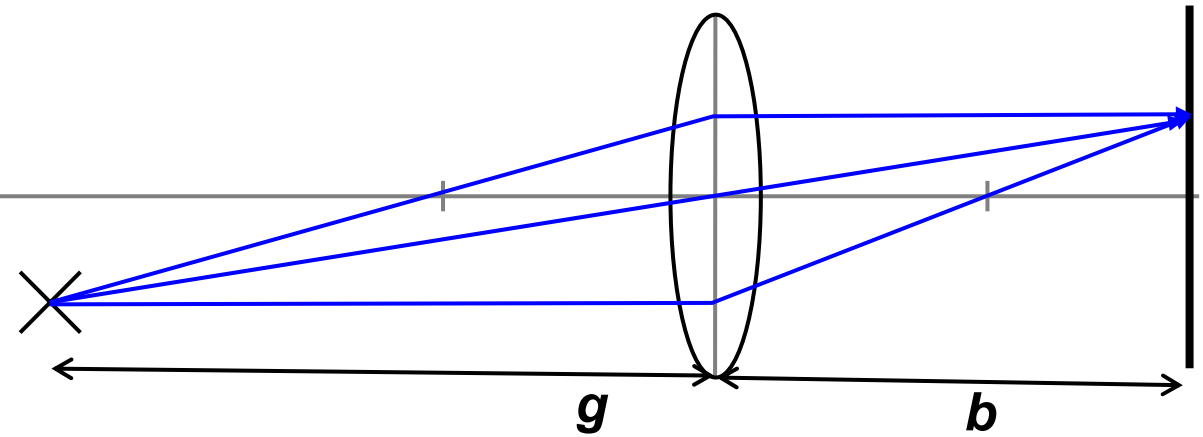


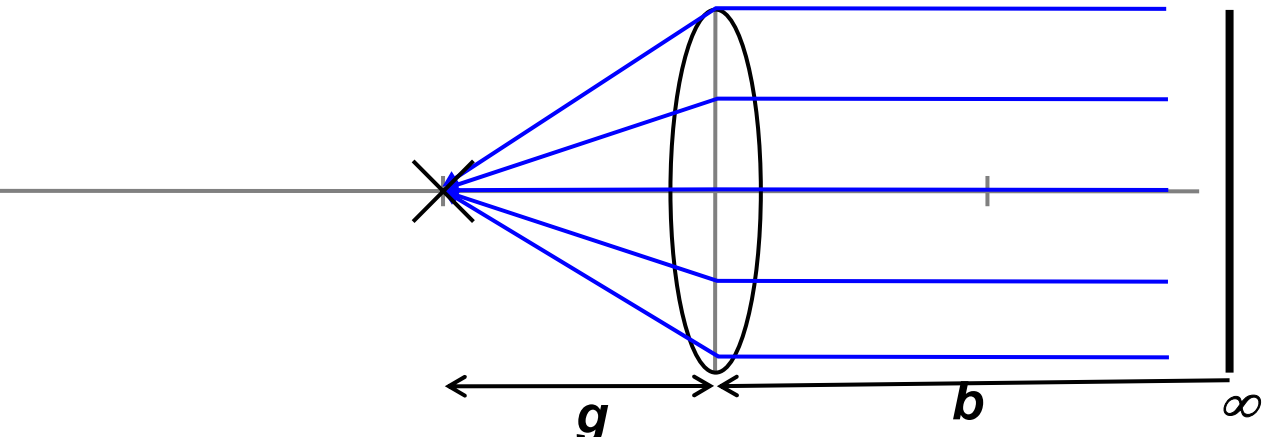
Linsenkamera

- **Camera obskura erzeugt ein scharfes Bild in der Bildebene, weil von jedem Objektpunkt nur ein Strahl durch das punktförmige optische Zentrum auf die Bildebene führt.**
- **Praktisch muss das Loch groß genug Licht durchzulassen, dadurch Unschärfe**
- **Linsenkamera erzeugt ein scharfes Bild, weil die Linse alle Strahlen eines Objektpunktes in einem Punkt der Bildebene sammelt.**

Der Weg des Lichtes

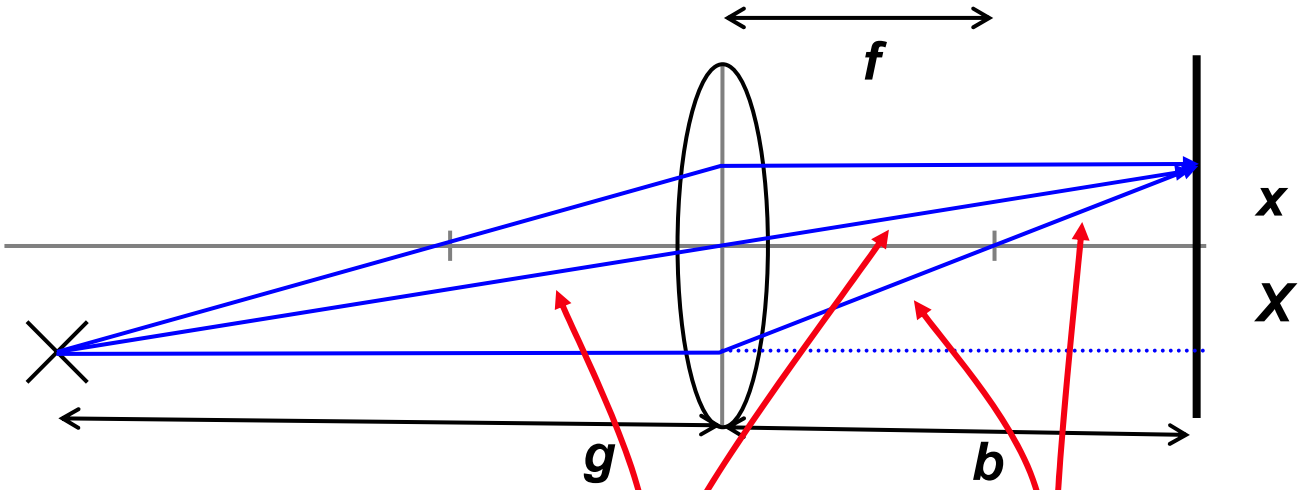






- **Linse konzentriert parallele Strahlen (Entfernung ∞) in der Brennebene (f)**
- **Strahlen parallel zur optischen Achse im Brennpunkt**
- **Strahlen durch das optische Zentrum bleiben unbeeinflusst.**
- **Daher opt. Zentrum wie bei Lochkamera**

Der Weg des Lichtes



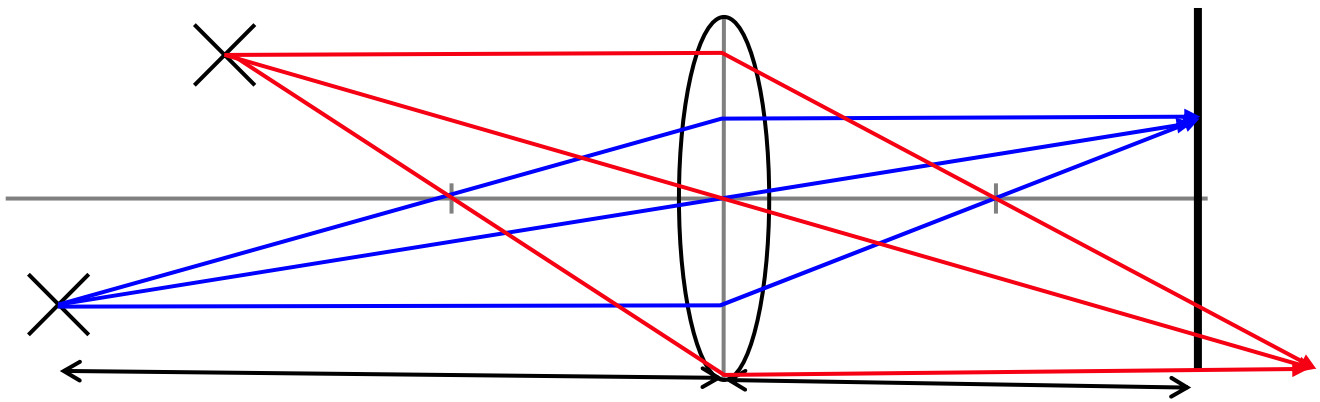
- **Linsengesetz**

$$\frac{1}{g}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}, \text{ weil } \quad \frac{X}{g}+\frac{X}{b}=\frac{x}{b}+\frac{X}{b}=\frac{x+X}{b}=\frac{X}{f}$$

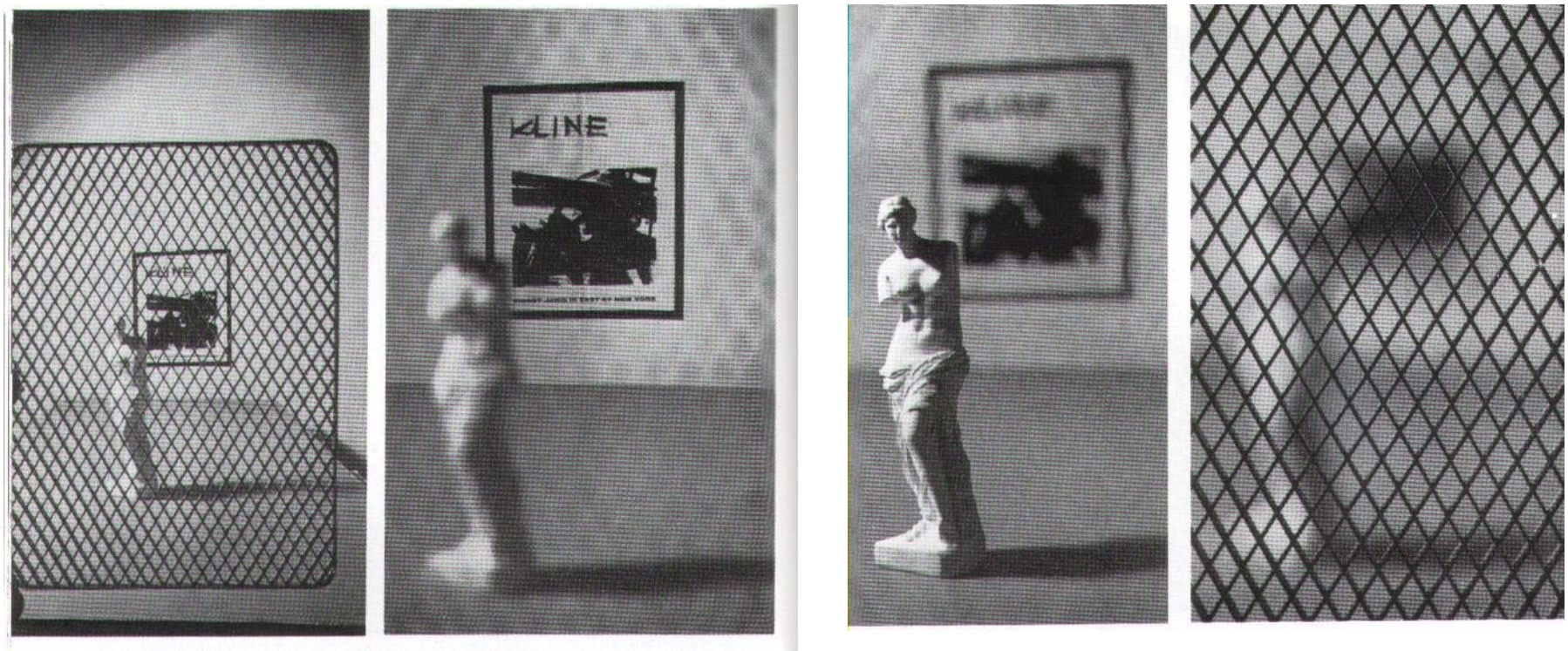
- **Beweis durch zwei mal Strahlensatz**

Der Weg des Lichtes

- Nur Objekte in einer festen Entfernung *g* werden (theoretisch) scharf abgebildet (vgl. blaue vs. rote Pfeile)
- Objektive müssen scharfgestellt, fokussiert werden (Ändern von *b*)
- Im Normalfall *g*>>*f*, dadurch sind Änderungen in *b* klein und ein ganzer Bereich wird praktisch scharf abgebildet (Schärfentiefe)
- Je größer die Linse (kleine Blende) desto größer wird die Unschärfe, d.h. desto kleiner die Schärfentiefe
- Schärfentiefe vor allen Dingen ein Problem im Nahbereich



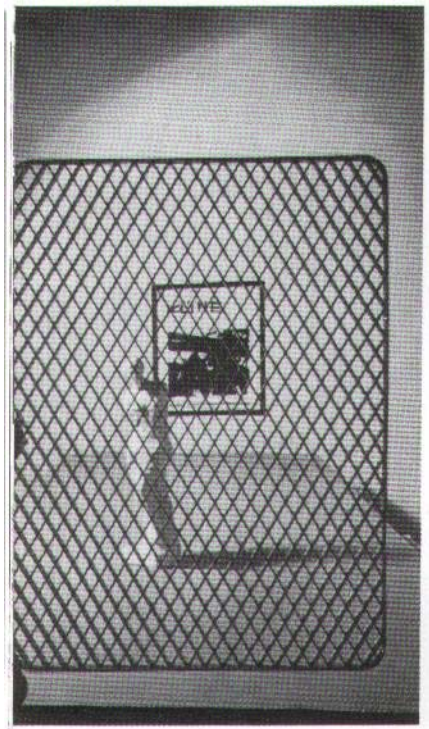
Der Weg des Lichtes



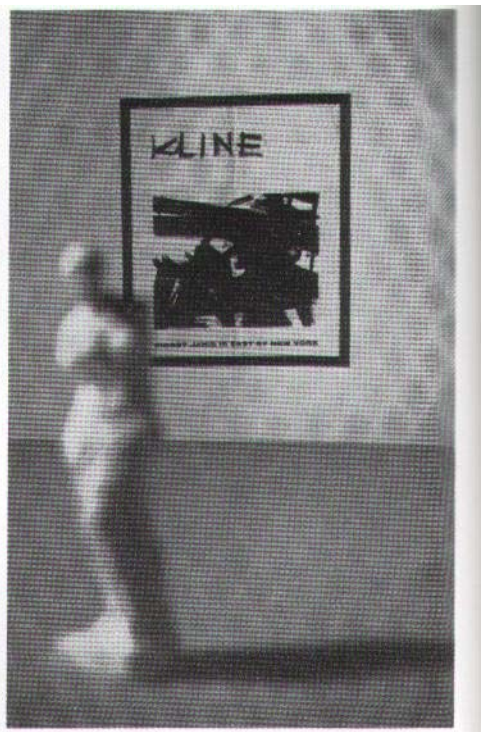
Frage an das Auditorium:
Welche Blende (klein, gross), welcher Fokus (vorn, mitte, hinten)?

Quelle: A. Feininger: Die hohe Schule der Fotographie, 1961

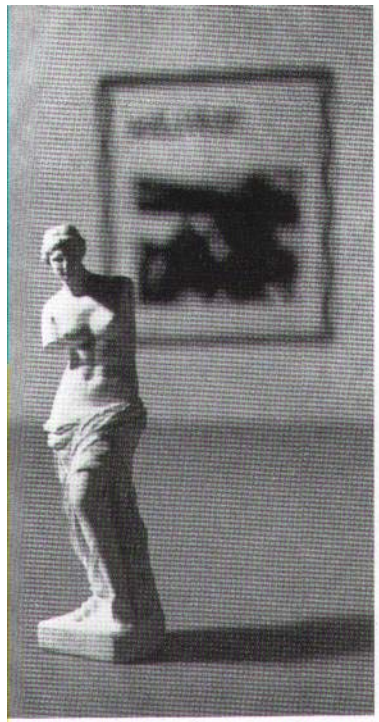
Der Weg des Lichtes



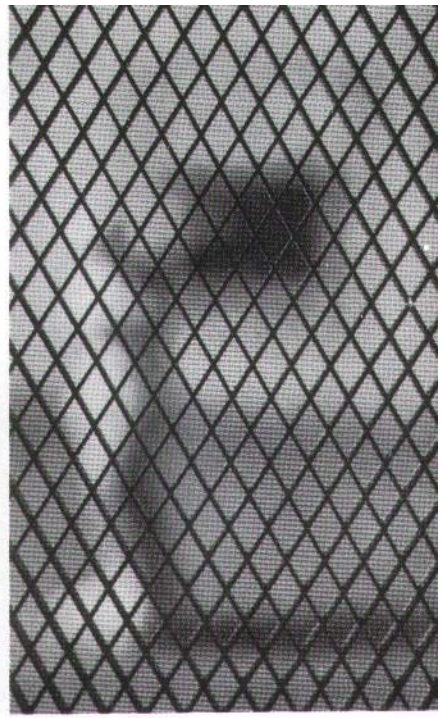
Große Blende / Schärfentiefe



Kleine Blende Fokus hinten



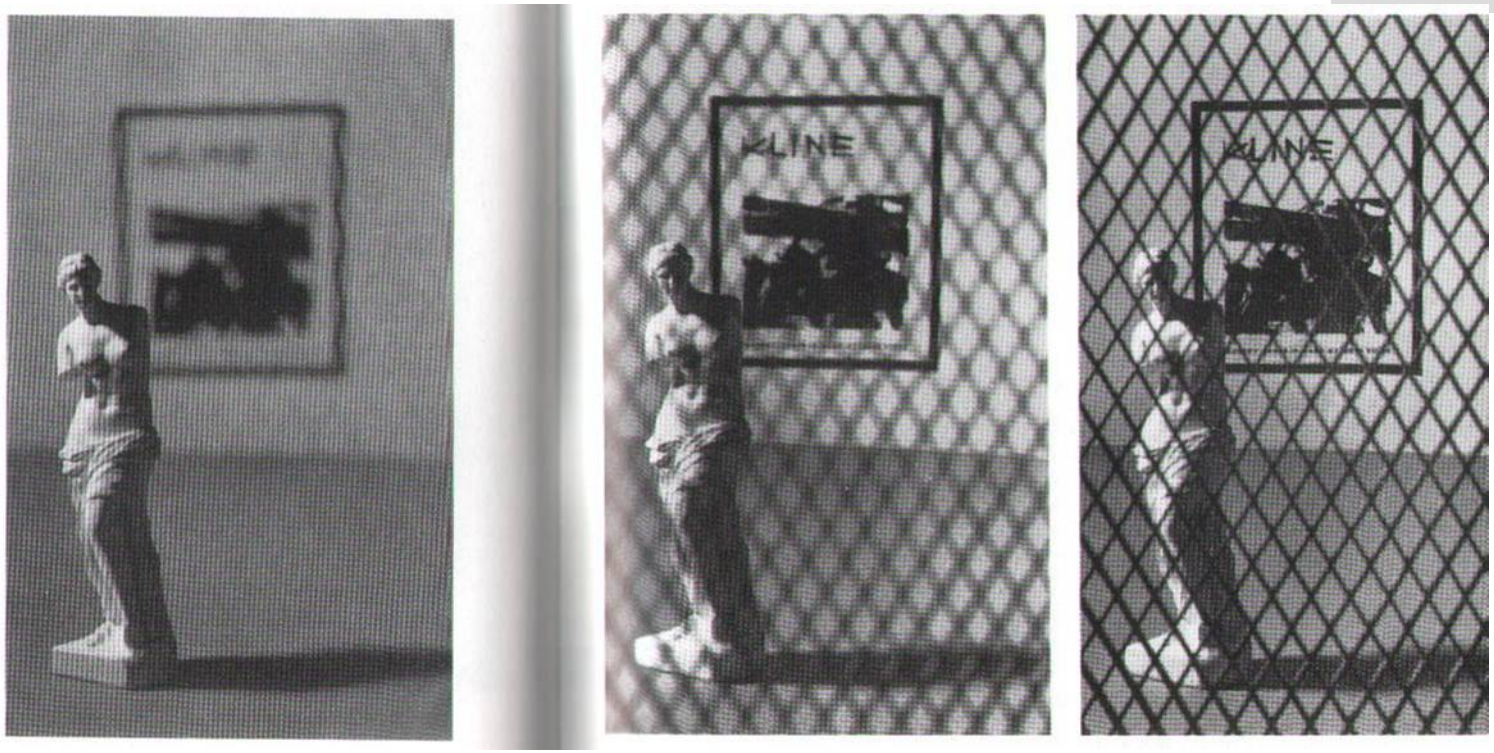
Kleine Blende Fokus mitte



Kleine Blende Fokus vorne

Quelle: A. Feininger: Die hohe Schule der Fotographie, 1961

Der Weg des Lichtes



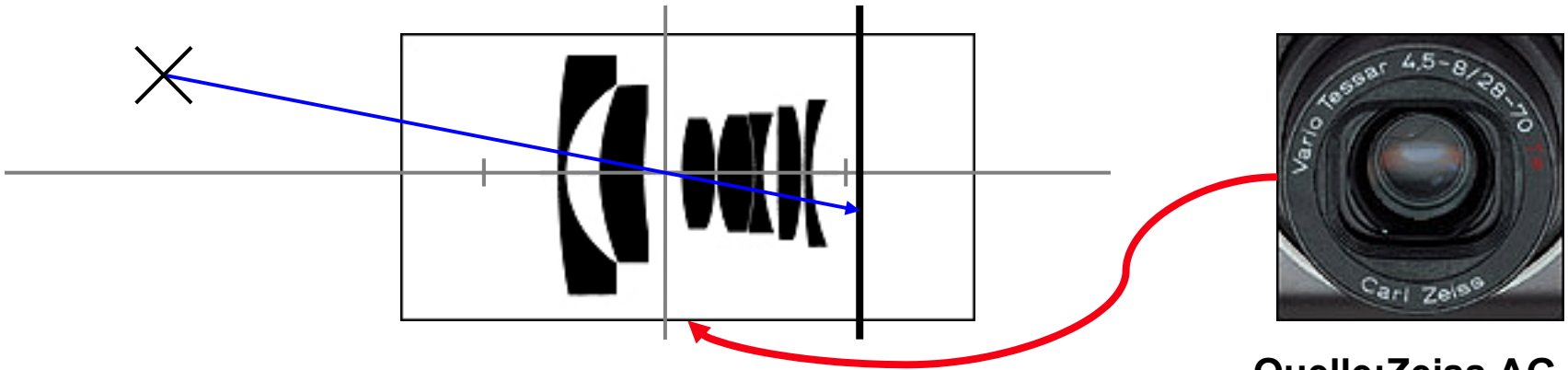
Kleine Blende / Schärfentiefe

Mittlere Blende / Schärfentiefe

Große Blende / Schärfentiefe

Quelle: A. Feininger: Die hohe Schule der Fotographie, 1961

Der Weg des Lichtes



Quelle:Zeiss AG
(www.zeiss.de)

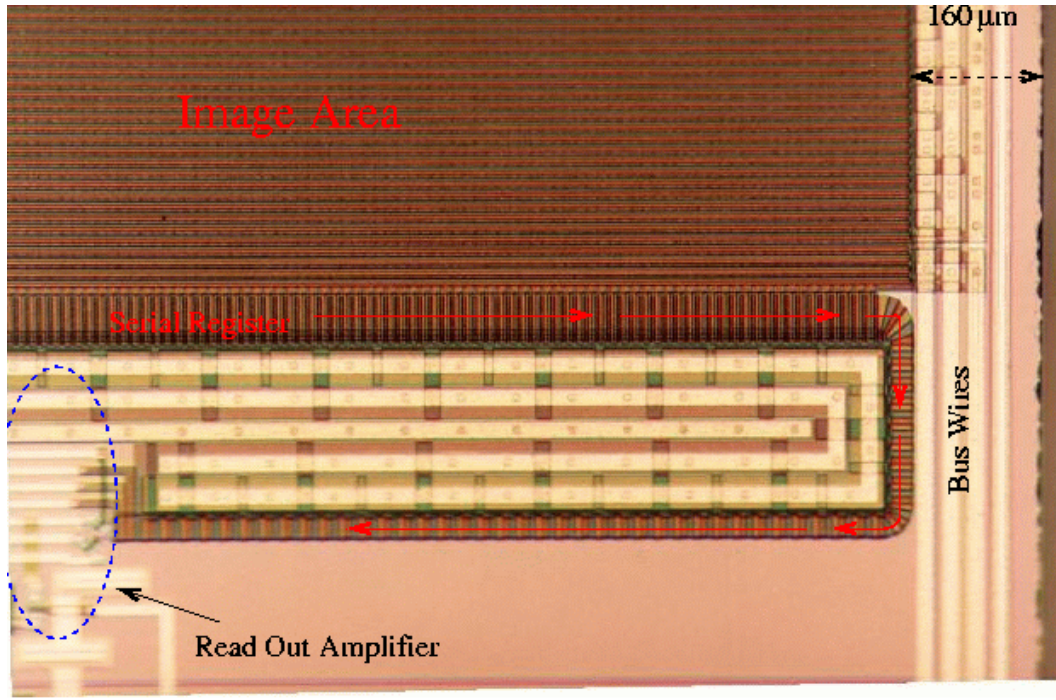
Komplexe Objektive

- **Moderne Objektive haben mehrere (3-9) Linsen**
- **Zoom, Fokus, Korrektur von Linsen- und Farbfehlern**
- **Aus Bildverarbeitungssicht wie eine einzelne Linse mit…**
  - Optischem Zentrum
  - Optischer Achse
  - Brennweite

Der Weg des Lichtes

Charge Coupled Device (CCD)

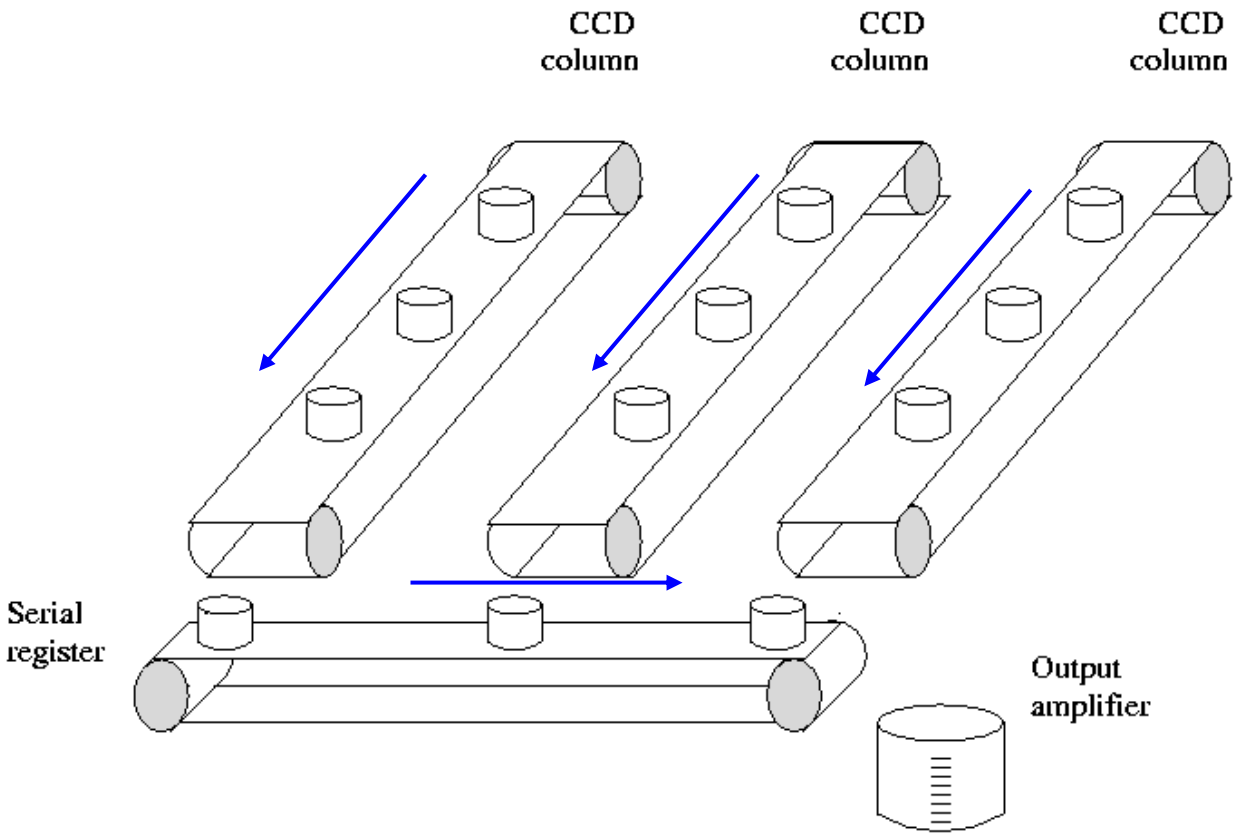
- **Sitzt in der Bildebene**
- **Rechteckiges Feld licht-emfindlicher Zellen (Pixel)**
- **Wandelt für jeden Pixel die Helligkeit in Spannung um (analog)**
- **Ende des Lichtweges, danach elektrisch**
- **Auslesen durch Verschieben der Ladung (Charge Coupled)**
- **Monochrom, Farbe später.**



Quelle (diese Grafik und folgende): M. Richmond, S. Tulloch: Introduction to CCDs (`http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/ccd1/ccd1.html`)

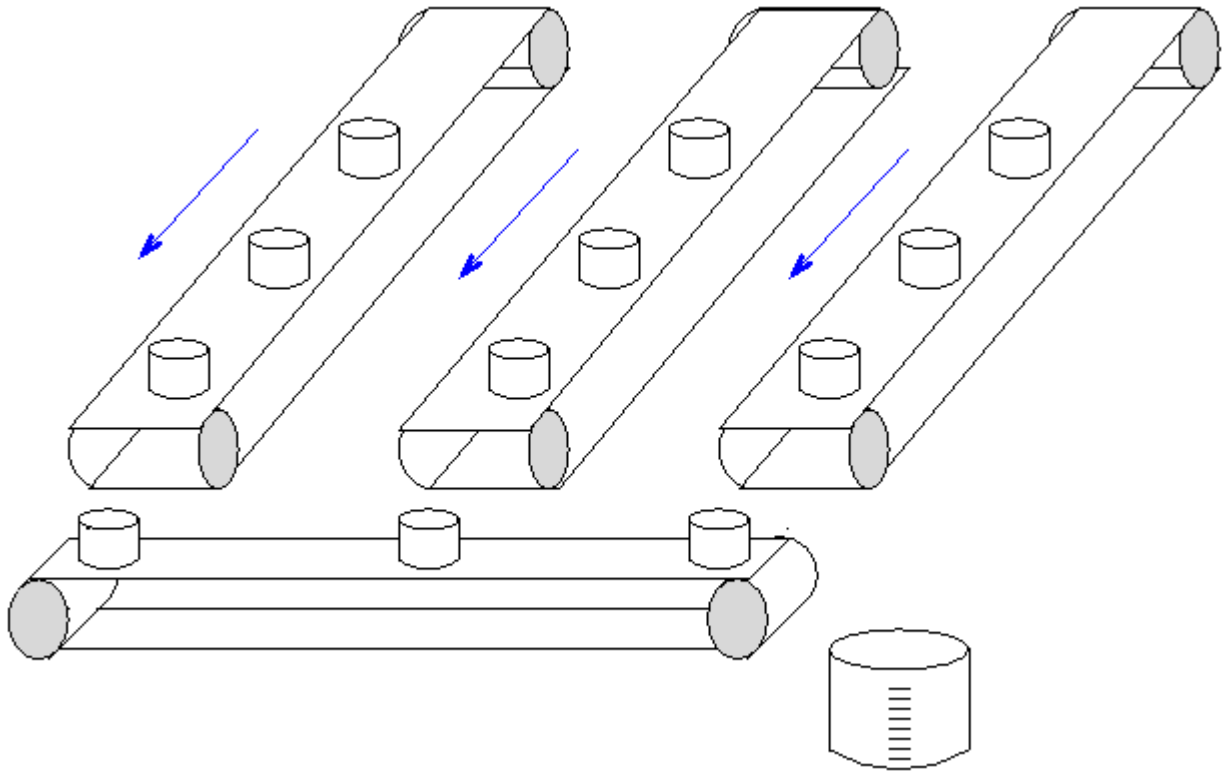
Der Weg des Lichtes

- **Analogie: Förderbänder von Eimern**
- **Im 2D Feld von Eimern (Pixel) wird Regen (Ladung) gesammelt.**
- **Die Spaltenförder-bänder schieben die Eimer zeilenweise nach unten**
- **Ein Zeilenförderband schiebt die Eimer zum Ausgang**



Der Weg des Lichtes

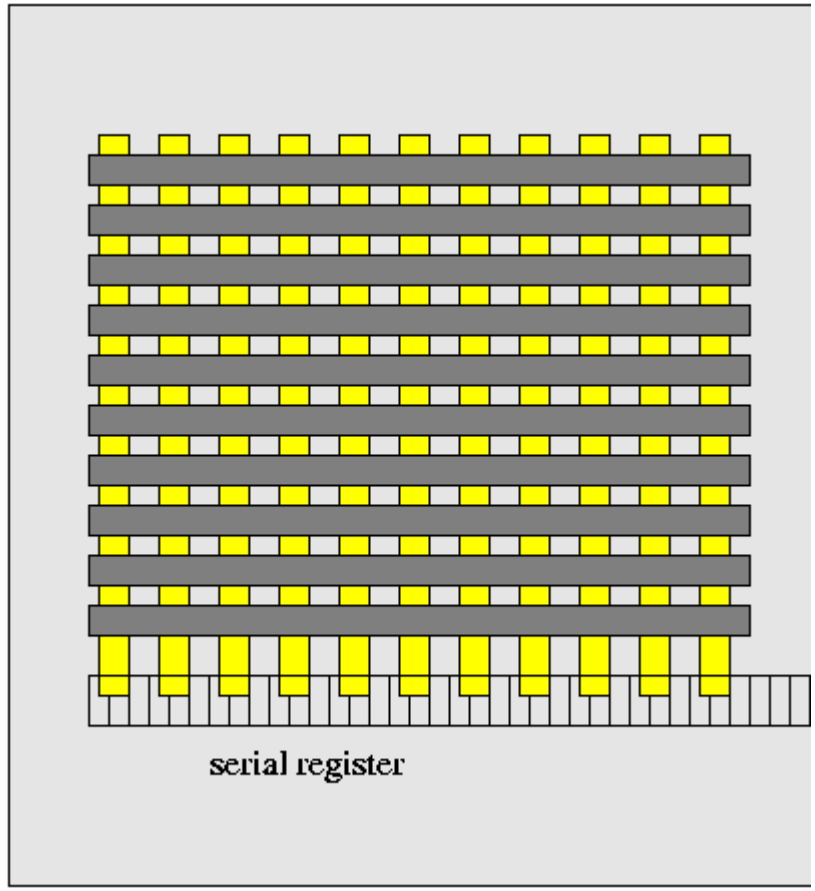
- **Analogie: Förderbänder von Eimern**
- **Im 2D Feld von Eimern (Pixel) wird Regen (Ladung) gesammelt.**
- **Die Spaltenförder-bänder schieben die Eimer zeilenweise nach unten**
- **Ein Zeilenförderband schiebt die Eimer zum Ausgang**



Der Weg der Ladung

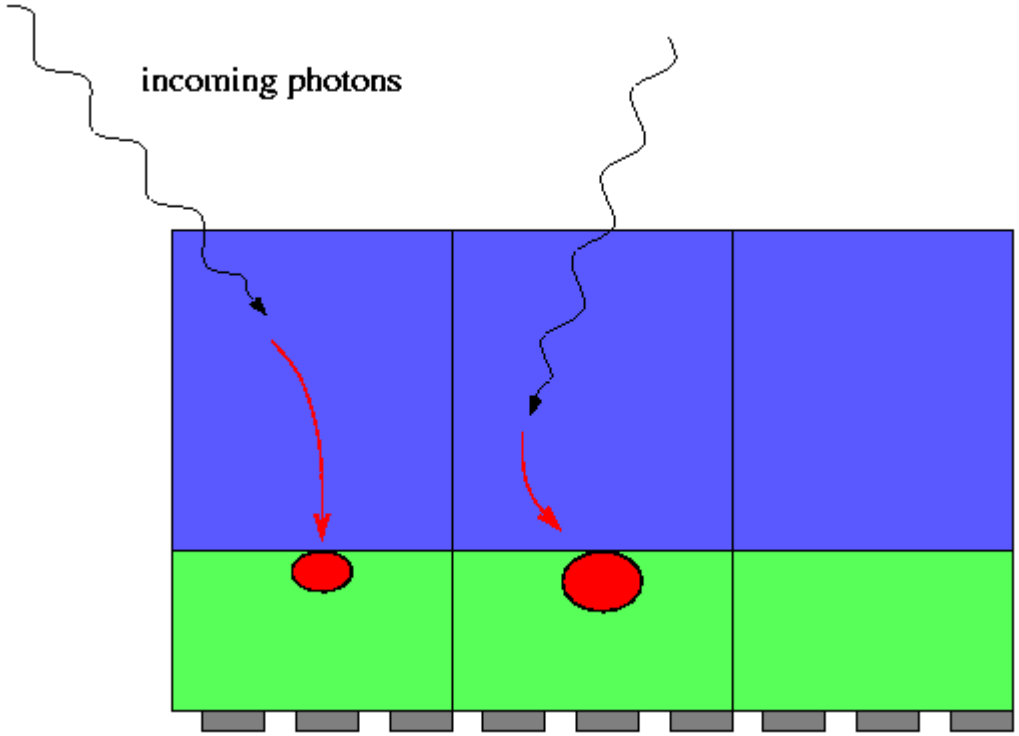
Charge Coupled Device (CCD)

- Pixel-Spalten durch isolierte Halbleiterregionen (gelb)
- Pixel-Zeilen durch jeweils 3 transparente Elektroden (grau)
- Ladung entsteht unter den Elektroden durch Licht (photoelektrischer Effekt)
- Vertikaler Transport durch Spannungsmuster an Elektroden
- Horizontaler Transport im „serial Register“ ebenfalls durch Spannungsmuster
- Serialisierung eines 2D Feldes



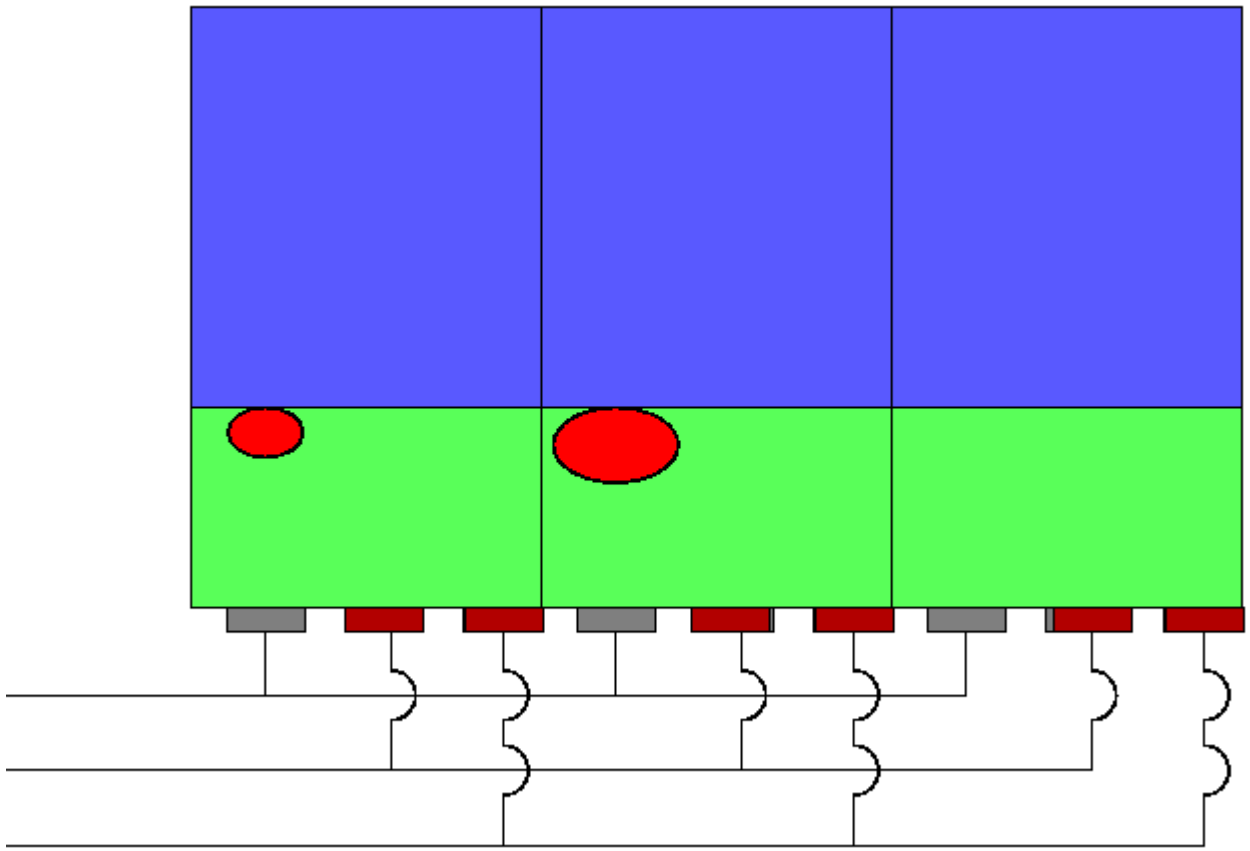
Der Weg der Ladung

- **Photonen (Licht) erzeugt Ladung (rot), die sich zwischen n-dotierter Zone (grün) und p-dotierter Zone (blau) sammelt.**



Der Weg der Ladung

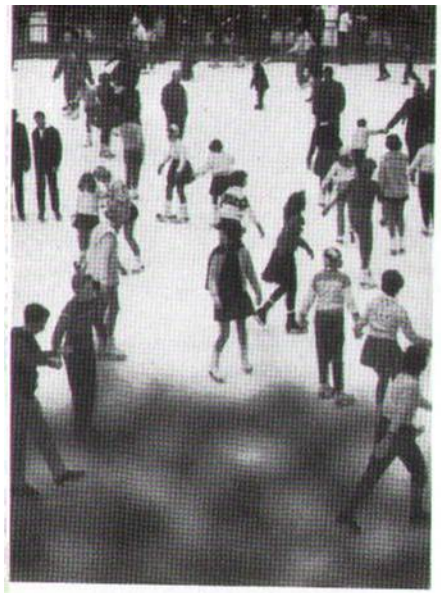
- Ladung sammelt sich unter positiver Elektrode
- Durch Spannungs-muster an Elektroden kann die Ladung bewegt werden



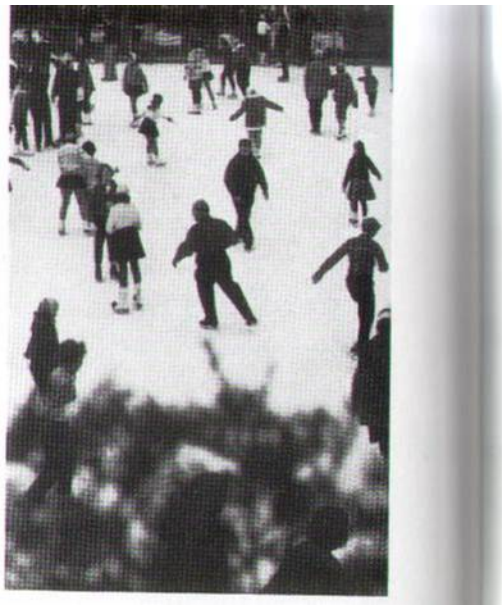
Der Weg der Ladung

- **Ladung wird von den lichtempfindlichen Zellen synchron in lichtgeschützte übertragen**
- **Dadurch Belichtungszeit (Shutter, Exposure) elektronisch steuerbar**
- **Digitalisieren der Ladungsmenge in Pixeldaten mit steuerbarer Verstärkung (Gain)**
- **Meistens Gammakurve: pixel = intensität$^{0.45}$**
- **Zusammenfassung CCD:**
  - Licht wird in Ladung umgewandelt
  - Ladung zeilenweise nach unten geschoben
  - Zeilen pixelweise nach rechts geschoben
  - Pixelweise digitalisiert
  - Belichtungszeit (Shutter), Verstärkung (Gain) einstellbar

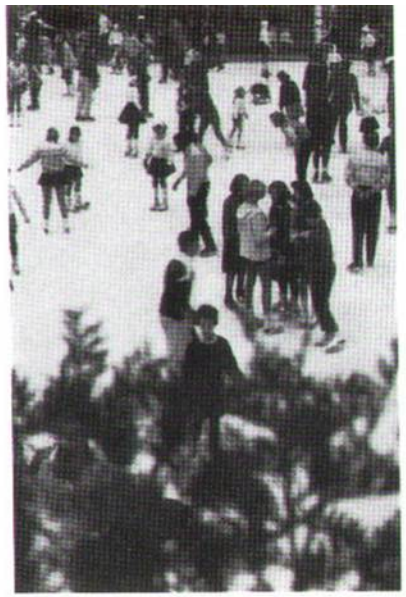
Der Weg der Ladung



1/1000s, Blende 2.8



1/250s, Blende 5.6



1/50s, Blende 12.5

1/10s, Blende 29

- Lange Belichtungszeit führt zu unscharfer Bewegung
- Niedrige Blende (großes Objektiv) führt zu geringer Schärfentiefe

Quelle: A. Feininger: Die hohe Schule der Fotographie, 1961

Der Weg der Daten

- Bei analogen (TV-Video) Kameras werden die Daten erheblich durch Bandfilterung, Farbaufmodulierung, Pixeljitter und viele andere Probleme beeinflußt.
- Bei digitalen Kameras direkt im Chip digitalisiert und per USB, FireWire (IEEE 1394) oder Ethernet an den Rechner geschickt
- Daten vom Treiber angenommen
- Per Bus-Master im Speicher abgelegt
- Für ein *w*×*h* Monochrombild:
  1 Byte je Pixel, w Pixel je Zeile, h Zeilen je Bild
  rel. Adresse von Pixel x, y ist x+w*y

- ```
  IplImage image;
  image.imageData[x+image.width*y]
  ```
  ```

Der Weg des Bildes in den Rechner

Faktoren, die die Bildhelligkeit beeinflussen.

	Probleme wenn groß	Probleme wenn klein
Objektivdurch-messer (1/Blende)	geringe Schärfentiefe	wenig Licht
Belichtungszeit (Shutter)	Bewegungs-unschärfe	wenig Licht
Verstärkung (Gain)	hohes Rauschen	benötigt viel Licht
Zoom	wenig Licht	wenig Auflösung
Beleuchtungs-stärke	aufwändig	wenig Licht
Beleuchtungs-entfernung	wenig Licht	ungleichmäßige Beleuchtung

Der Weg des Bildes in den Rechner

Frage an das Auditorium:
Welche Kombination Beleuchtung, Blende, Belichtung, Verstärkung:

- **In einer urigen Kneipe das Billardspiel verfolgen**
- **Fußballspielender Roboter**
- **Kamera an der Spitze eines Flugzeugs**
- **Laufroboter im Gebüsch**

Der Weg des Bildes in den Rechner

Frage an das Auditorium:
Welche Kombination Beleuchtung, Blende, Belichtung, Verstärkung:

- **In einer urigen Kneipe das Billardspiel verfolgen**
  - Kamera über Tisch, großes Objektiv / kleine Blende, kurze Belichtung
- **Fußballspielender Roboter**
  - kleines Objektiv / große Blende, kurze Belichtung, viel Licht
- **Kamera an der Spitze eines Flugzeugs**
  - großes Objektiv / kleine Blende (alles gesehene ist weit entfernt), kurze Belichtung
- **Laufroboter im Gebüsch**
  - kleines Objektiv / große Blende, lange Belichtung

Der industrielle Ansatz

Der industrielle Ansatz

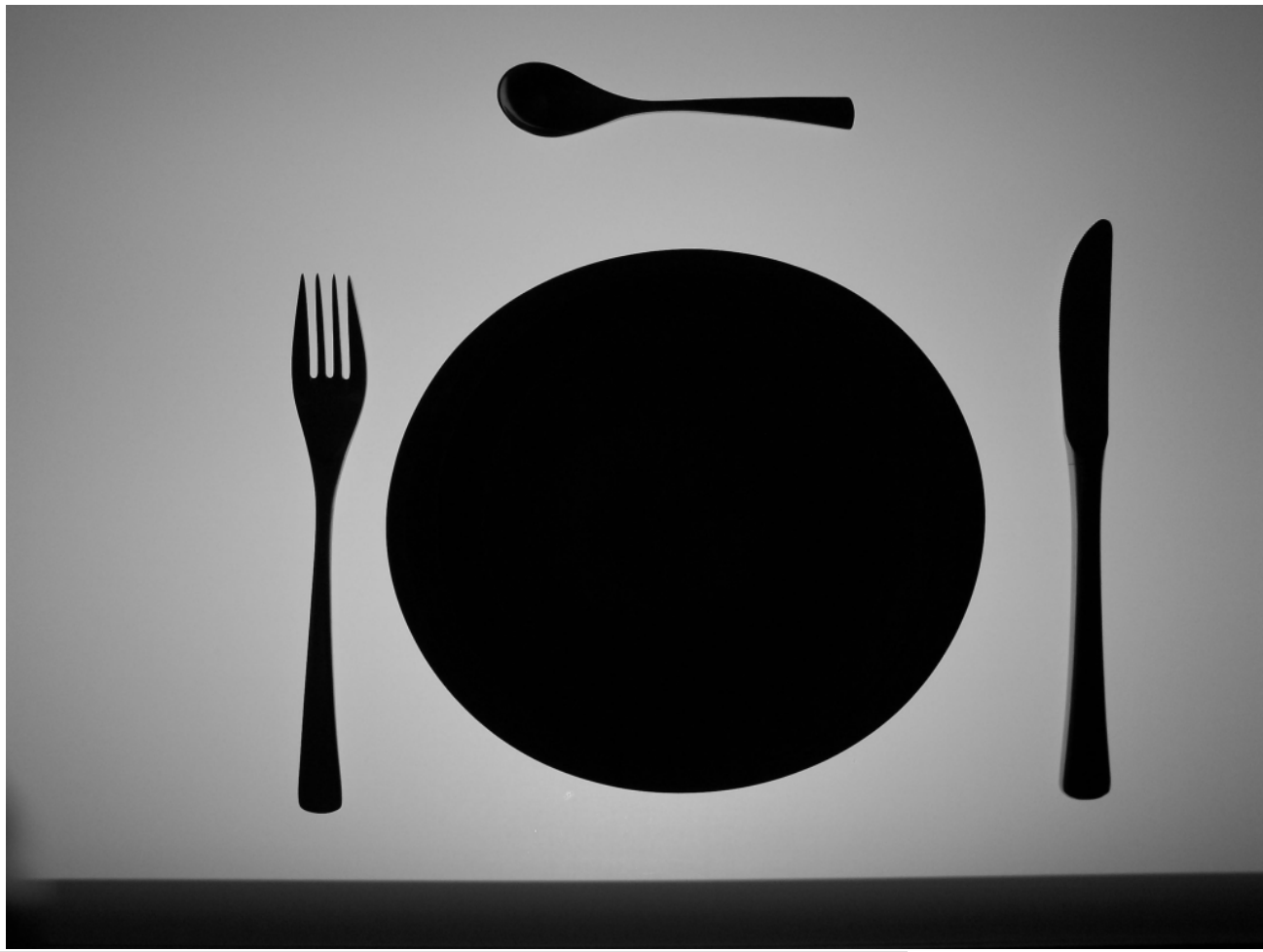
- **Übungsblatt 1**
- **Standardvorgehensweise für einfache BV Probleme in der Qualitätssicherung**
- **Objekt einzeln vor Durchlichtkasten**
- **Rechenschritte:**
  - Binarisierung mit Intensitätsschwellwert (dunkel = Objekt, hell = Hintergrund)
  - Regionenbildung (Run Length Encoding, union-find Algorithmus)
  - Merkmale der Regionen (Fläche, Länge, Breite, Schwerpunkt, Hauptträgheitsachsen, etc.)
  - Anwendungsspezifische Beurteilung (stimmen Position, Masse, etc.)

Quelle:Leutron Vision Inc., (`www.leutron.com`)

Der industrielle Ansatz

Bildaufnahme vor Durchlichtkasten

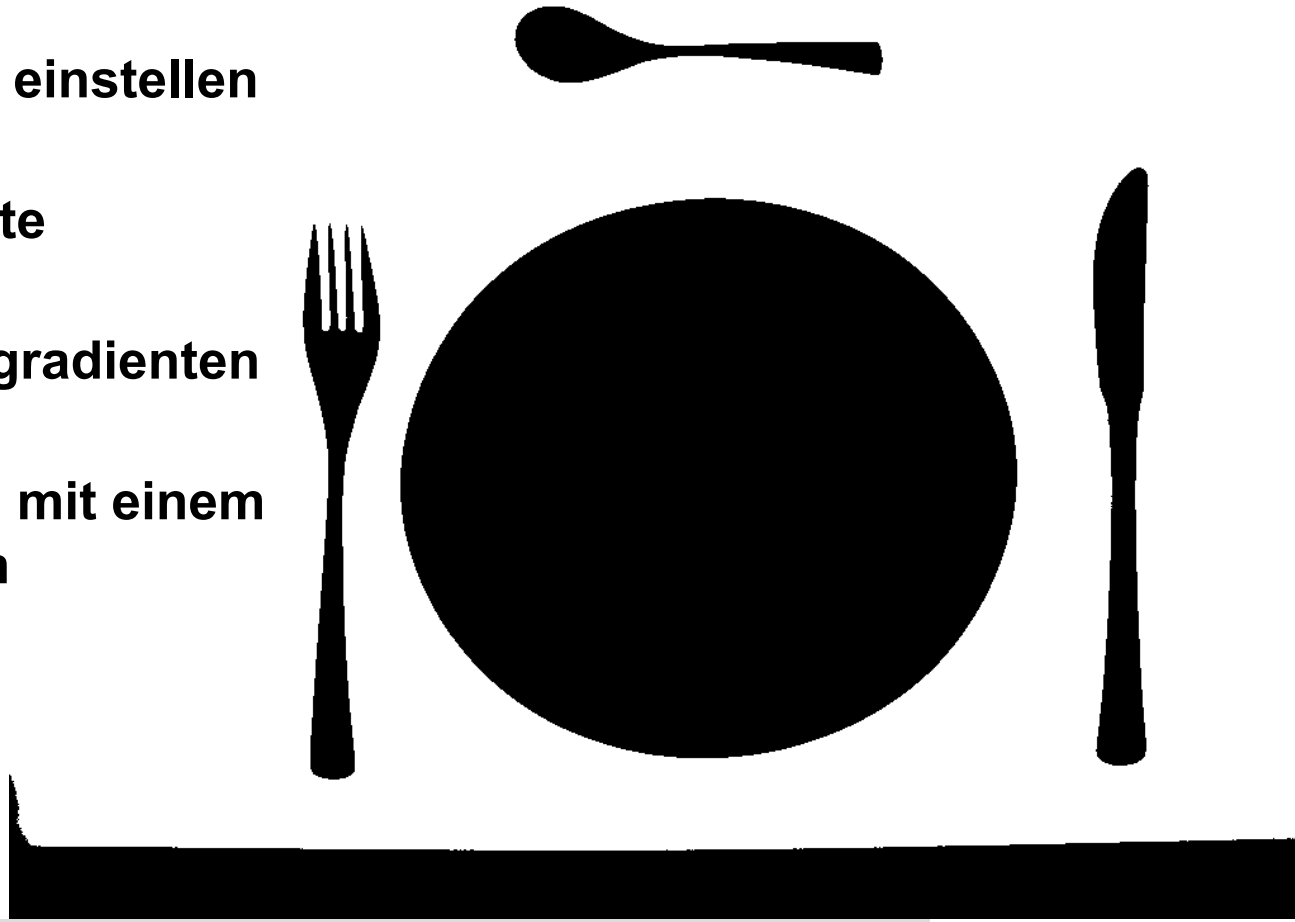
- Beispielszene aus den Übungen
- Fast perfektes Bild
- Leichter Helligkeitsgradient
- Leichte Reflexionen an Löffel und Messer



Schwellwert & Morphologie

Binarisierung

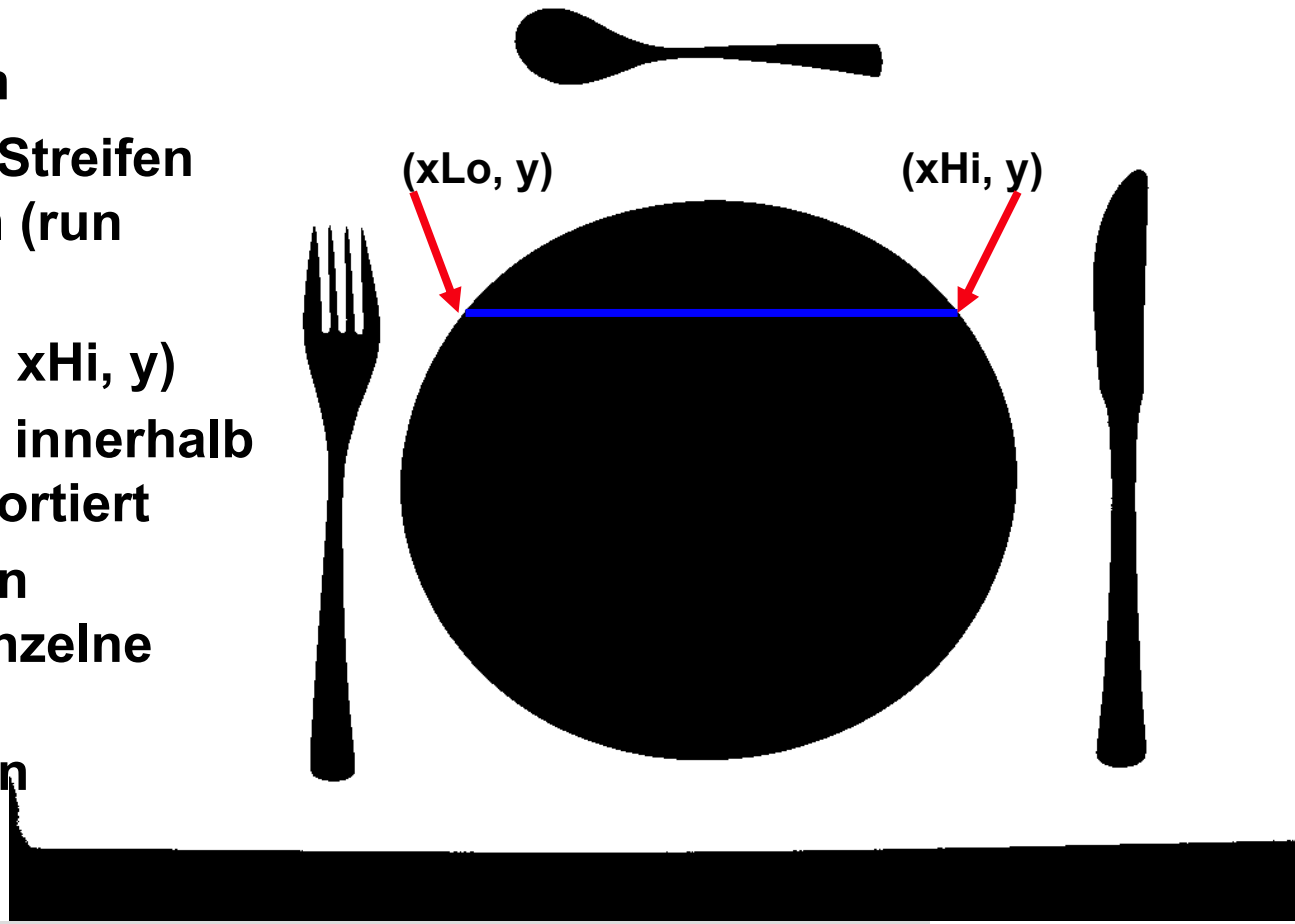
- **Festen Schwellwert einstellen**
- **oder automatischer Schwellwert (nächste Vorlesung)**
- **oder Beleuchtungsgradienten bestimmen**
- **Resultierendes Bild mit einem Bit / Pixel speichern**



Schwellwert

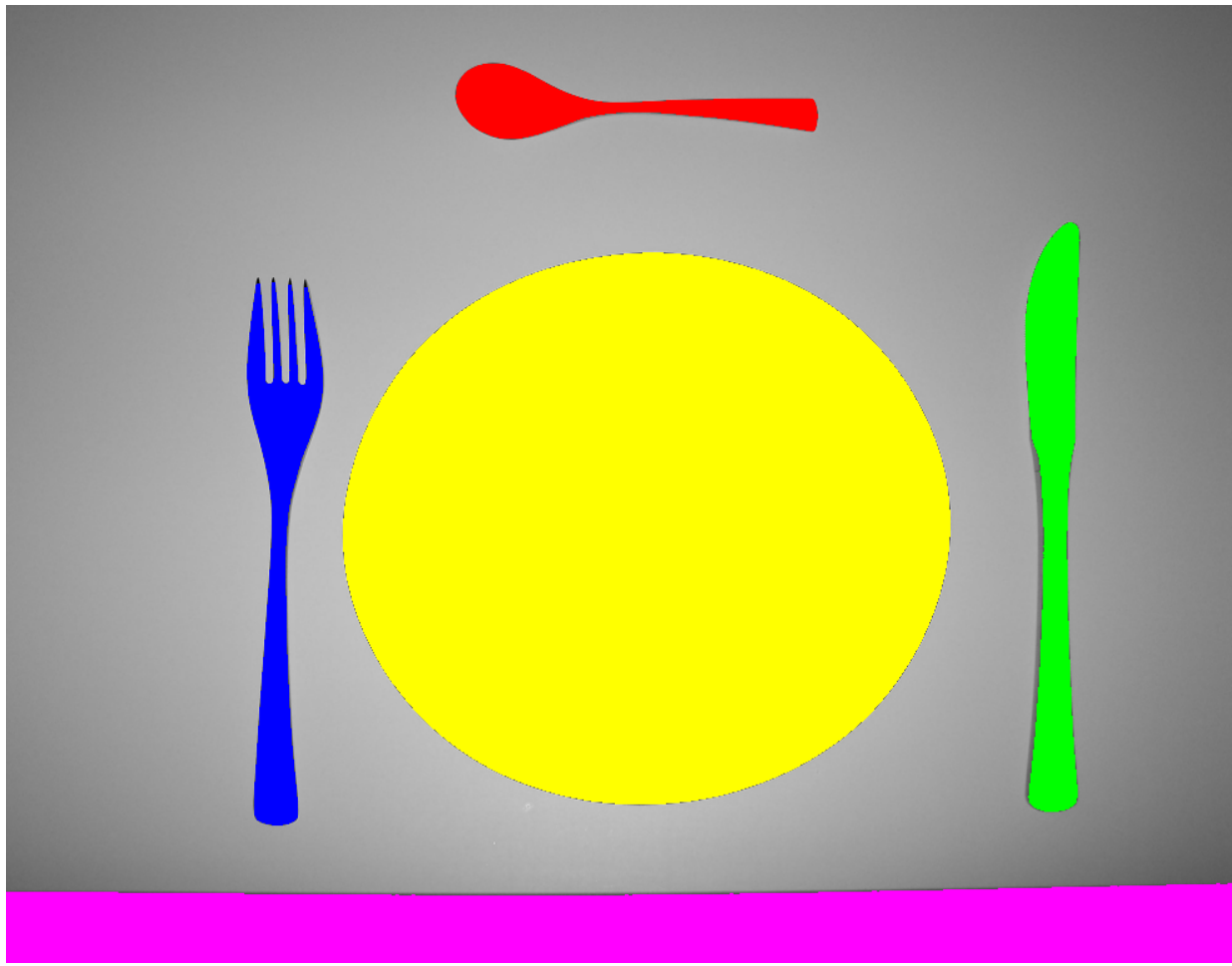
Binarisierung

- Bit / Pixel speichern
- oder in horizontale Streifen (Intervalle) zerlegen (run length encoding)
- Jeder Streifen (xLo, xHi, y)
- Streifen nach y und innerhalb einer Zeile nach x sortiert
- Zuerst alle Regionen gemischt, später einzelne Zusammenhangs-komponenten finden



Regionenbildung

- **Aufgabe: Region aus zusammenhängenden schwarzen Pixeln bilden, d.h. mit einheitlicher Zahl/Farbe versehen**
- **Grundidee: „Ist Dein Nachbarpixel noch schwarz, fülle Ihn!“**
- **Grassfire Algorithmus: Breitensuche**
- **Floodfill Algorithmus: (rekursive) Tiefensuche**



Regionenbildung (Floodfill Alg.)

```
fill (image, x, y, regionColor) { // fülle (x,y) und seine schwarze Region
   if (image(x,y)!=black) return; // schon gefüllt oder weiß
   image(x,y) = regionColor;
   if (x>0) fill (image, x-1, y, regionColor);
   if (x<image.width-1) fill (image, x+1, y, regionColor);
   if (y>0) fill (image, x, y-1, regionColor);
   if (y<image.height-1) fill (image, x, y+1, regionColor);
}
groupRegions (image) { // fülle Regionen mit unterschiedlichen Farben
   regionColor = firstColor;
   for (int y=0; y<image.height; y++)for (int x=0; x<image.width; x++)
      if (image(x,y)==black)   // neue ungefüllte Region
         fill (image, x, y, regionColor++);
}
```

Regionenbildung (Floodfill Alg.)

- Rechenzeit O(width*height)
- Schneller als Grassfire
- Obige Implementierung langsam wegen Rekursions-Overhead
- Schneller: Binärbild zuerst in run-length-code Intervalle konvertieren, dann Regionenbildung dort durchführen.
- Grundidee: „Laufe mit zwei Zeigern im Zeilenabstand durch die Intervalle, immer wenn sich zwei Intervalle berühren, vereinige die Regionen“

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

- iv1 (roter Rahmen) läuft durch die Intervalle
- iv2 (blauer Rahmen) läuft eine Zeile hinterher

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

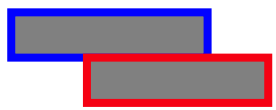
```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```



Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

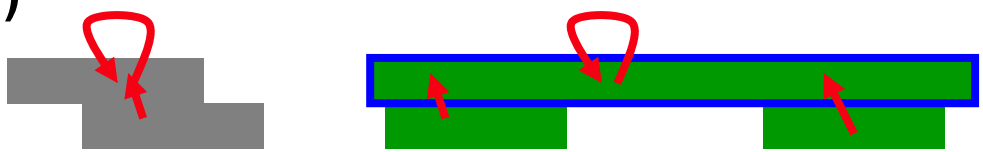
```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
groupRegions (vector<Interval> rle) { // Setze .region in Regionen
   iv1 = iv2 = rle.begin();
   while (iv1!=rle.end()) {
      while (iv2->y < iv1->y-1 || // iv2 links/oberhalb kein Kontakt
             iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xHi < iv1->xLo) iv2++;
      if (iv2->y == iv1->y-1 && iv2->xLo <= iv1->xHi) { // iv1-iv2 Kontakt
         unite (iv1, iv2);
         if (iv2->xHi>iv1->xHi) iv1++; // iv1 kann keinen iv2++ Kontakt haben
         else iv2++; // iv2 kann keinen iv1++ Kontakt haben
      }
      else iv1++; // iv2 hat keinen iv Kontakt
} }
```

Regionenbildung (Union-Find Alg.)

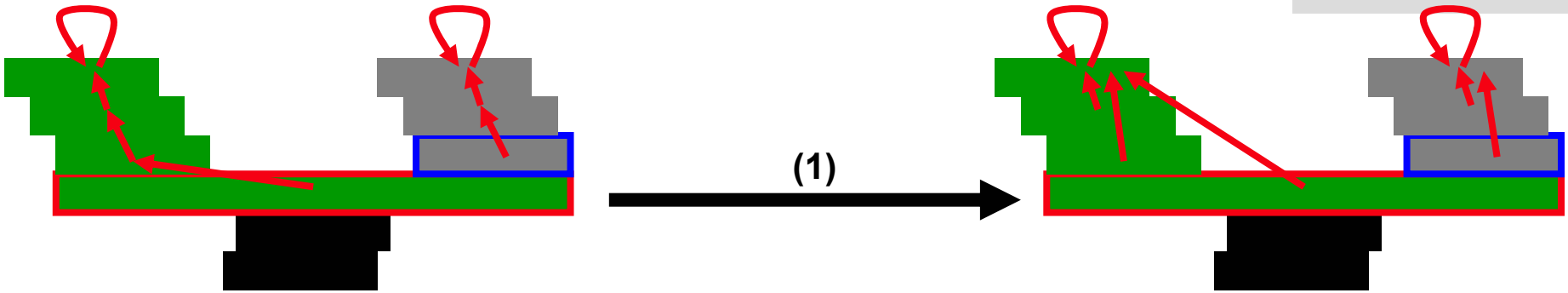
- **Wie macht man `unite` effizient? Union-Find Datenstruktur (PI2)**
- **Intervall hält Zeiger auf ein früheres Intervall der selben Region**
- **Erstes Intervall (Wurzel) hält aus technischen Gründen einen Zeiger auf sich selbst statt eines Nullzeigers**
- **Eine Region sind all die Intervalle mit gemeinsamen Wurzelknoten**
- **Vereinigen zweier Regionen iv1 und iv2**
  - Wurzelintervall von iv1 und iv2 finden.
  - Den späteren von beiden auf den früheren zeigen lassen
- **Pfadkomprimierung: Während des Suchens des Wurzelintervalls alle Intervalle direkt auf die Wurzel zeigen lassen.**
- **Rechenzeit amortisiert fast O(1)**



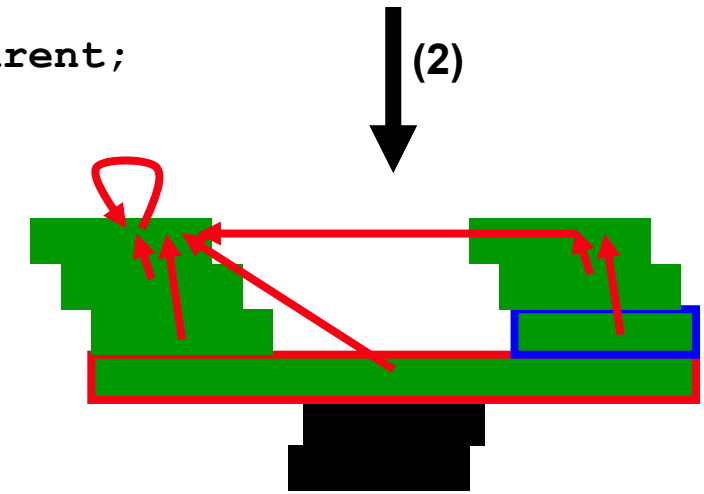
Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
class Interval {
  int xLo, xHi, y; // horizontaler Streifen (xLo,y)-(xHi,y)
  Interval* parent; // Für union-find-Baum, initialisert: auf sich selbst
}
pathCompress (iv) // Hänge Knoten bis zur Wurzel direkt an die Wurzel
    root = iv;
    while (root->parent!=root) root = root->parent; // Zur Wurzel laufen
    while (iv!=root) {
       buffer = iv->parent;
       iv->parent = root; // Direkt an die Wurzel hängen
       iv = buffer;
    }
}
unite (iv1, iv2) { // Vereinige die Regionen von iv1 und iv2
    pathCompress (iv1); pathCompress (iv2);
    if (iv1->parent<iv2->parent) iv2->parent->parent = iv1->parent;
    else iv1->parent->parent = iv2->parent;
}
```

Regionenbildung (Union-Find-Alg.)




```
pathCompress (iv)
   root = iv;
   while (root->parent!=root) root = root->parent;
   while (iv!=root) {
      buffer = iv->parent; iv->parent = root;
      iv = buffer;
}  }
unite (iv1, iv2) {
(1) pathCompress (iv1); pathCompress (iv2);
(2) if (iv1->parent<iv2->parent)
      iv2->parent->parent = iv1->parent;
   else iv1->parent->parent = iv2->parent;
}
```



Regionenbildung (Union-Find-Alg.)

```
void setRegionIndex (vector<Interval> rle)
{
   iv = rle.begin();
   regionCtr = 0;
   while (iv!=rle.end()) {
      if (iv->parent==iv) {
         iv->region = regionCtr;
         regionCtr++;
      }
      else iv->region = iv->parent->region;
   }
}
```

- **Setzen der Indices für die jeweiligen Regionen im Rahmen eines abschließenden Durchlaufes**
- **Da nicht alle Pfade voll komprimiert sind**

Zusammenfassung

- **Weg des Bildes in den Rechner wird durch viele Faktoren beeinflußt**
  - Optik der Szene: Beleuchtung, Verdeckung, Schatten, Reflexionen
  - Objektiv: Öffnungswinkel, Blende, Belichtung
  - Beleuchtung, Blende und Belichtung gut wählen, keine Über- / Unterbelichtung
  - CCD Chip, USB / Firewire Datenübertragung: Beschränkt Auflösung / Bildrate
- **„Industrieller Ansatz“**
  - Aufnahme vor Durchlichtkasten, Segmentierung über Schwellwert
  - Darstellen als Vereinigung von Intervallen (run length encoding)
  - Regionenbildung über Union-Find-Algorithmus
  - Merkmale und Applikationsabhängige Bewertung der Merkmale
- **Union-Find-Algorithmus (fast O(Intervallzahl))**
  - Zwei Zeiger laufen durch die Intervalle im Abstand einer Zeile
  - Regionen sich berührende Intervalle werden vereinigt
  - Region dargestellt durch zur Wurzel gerichteten Baum