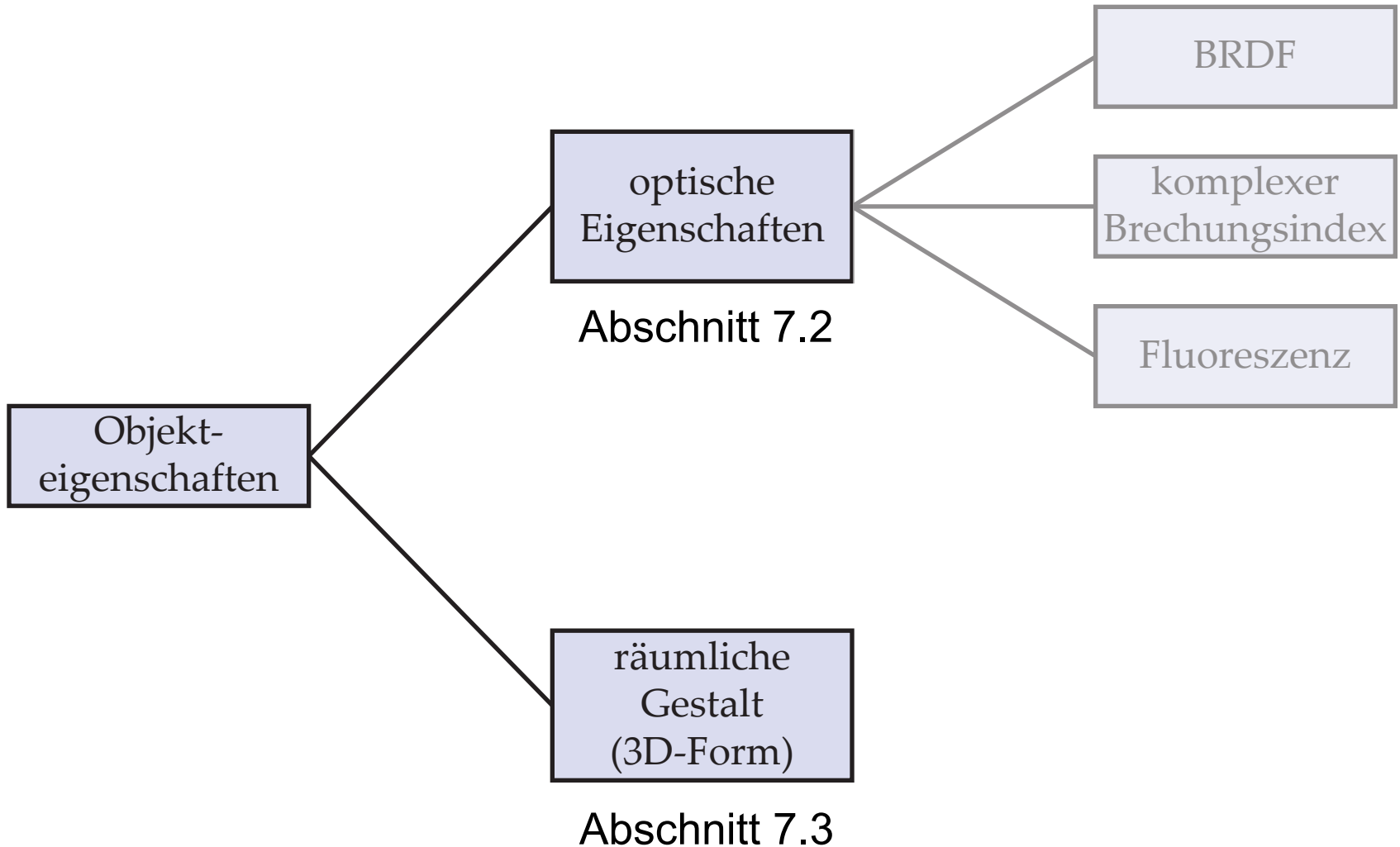
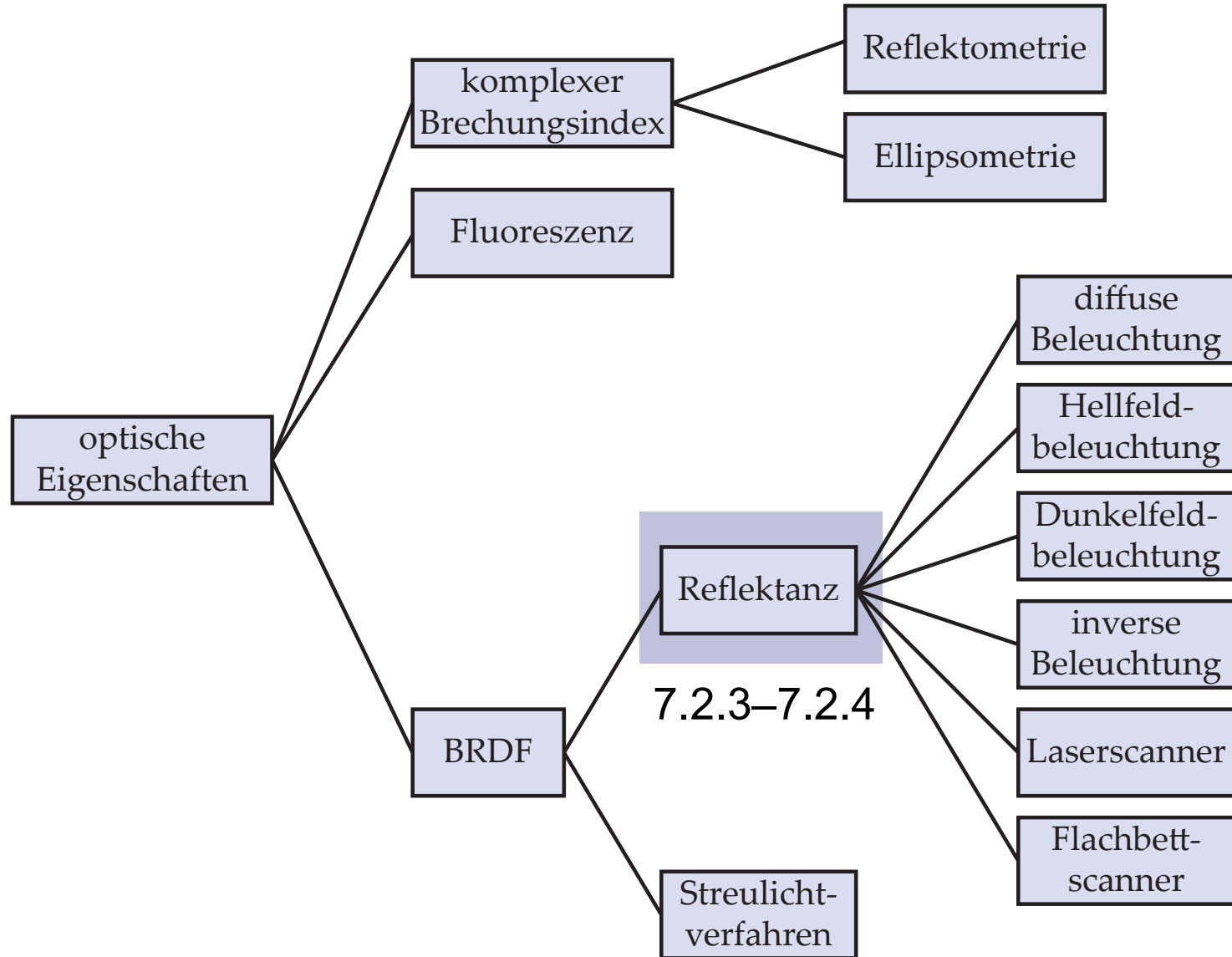


7. Bildaufnahmeverfahren

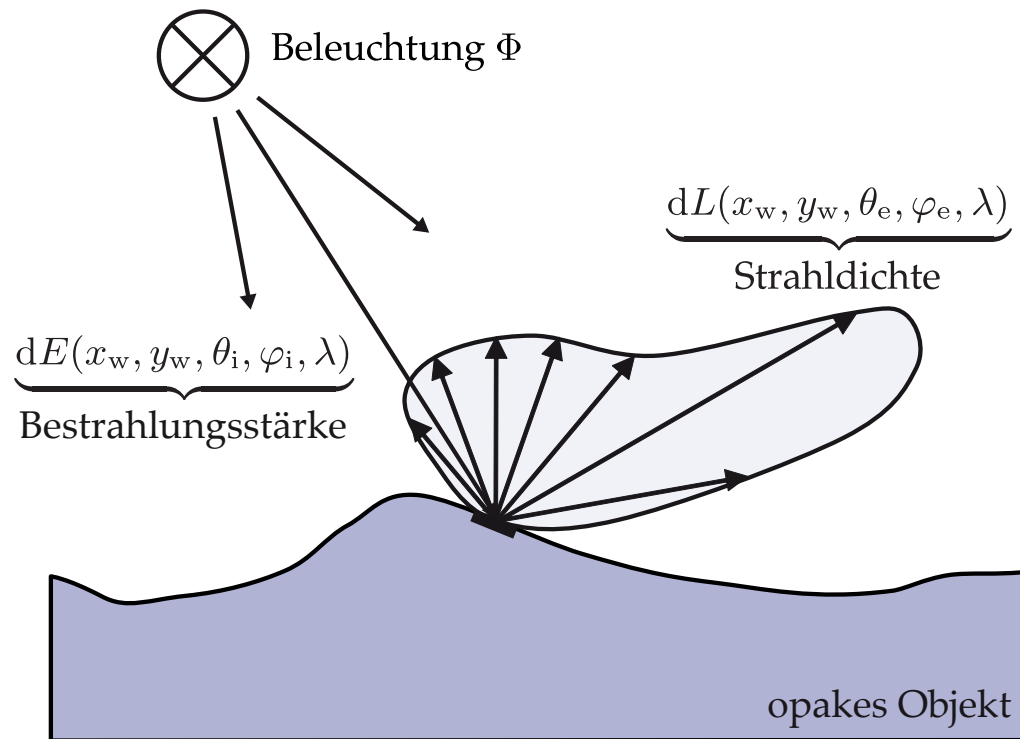
Welche Eigenschaften eines Objekts sind von Interesse?





- Reflektanzeigenschaften eines Objekts durch **bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion** (BRDF) beschreibbar:

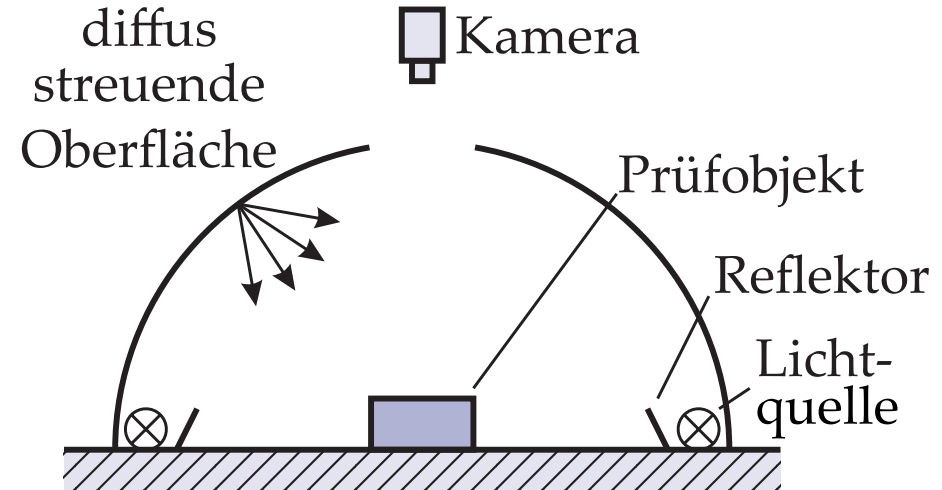
$$\text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_e, \varphi_e) = \frac{dL_e(\theta_e, \varphi_e)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}$$



- **Problem:** BRDF abhängig von \mathbf{x} und λ (bei 2D-Bildern \rightarrow 7-dimensional)

7.2.3.1 Diffuse Beleuchtung

- Licht hat keine ausgeprägte Vorzugsrichtung
- Realisierungsmöglichkeiten:
 - flächenhafte Lichtquelle
 - homogen beleuchtete, diffus streuende Oberfläche



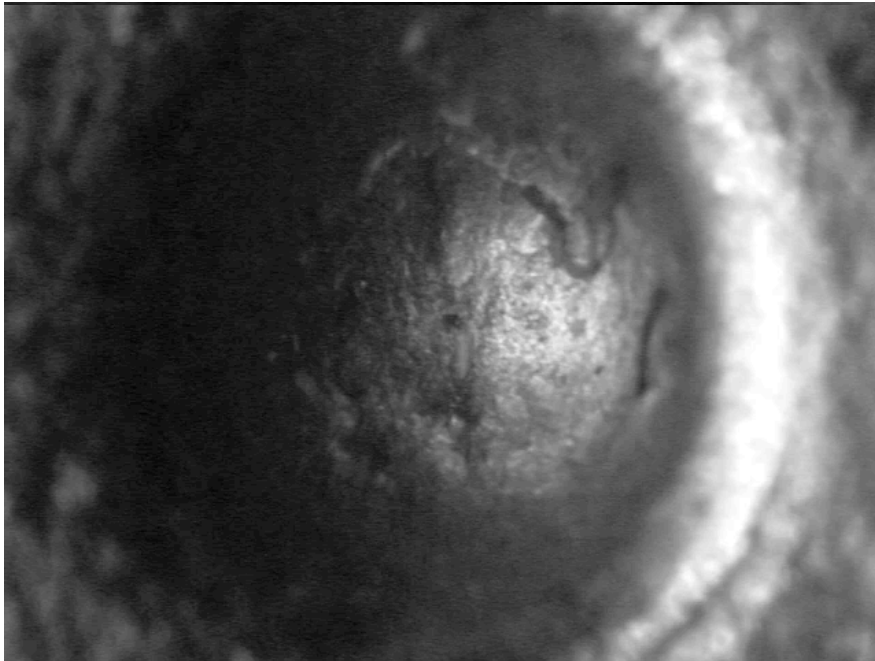
Diffuse Beleuchtung mit Hilfe eines halbkugelförmigen Schirms

Eigenschaften

- + kein Schattenwurf
- + kaum Glanzlichter bei stark reflektierenden Oberflächen
- reliefbedingte Strukturen erscheinen kontrastarm

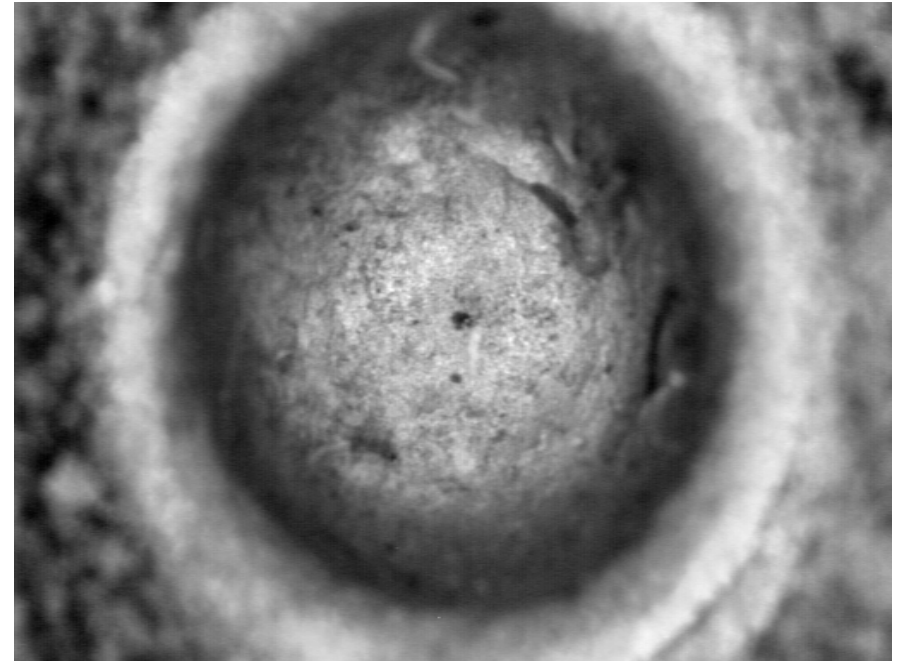
Beispiel: Schlagbolzeneindruck einer Patronenhülse

Gerichtete Beleuchtung



- + lokal hoher Kontrast
- ungleichmäßige Ausleuchtung

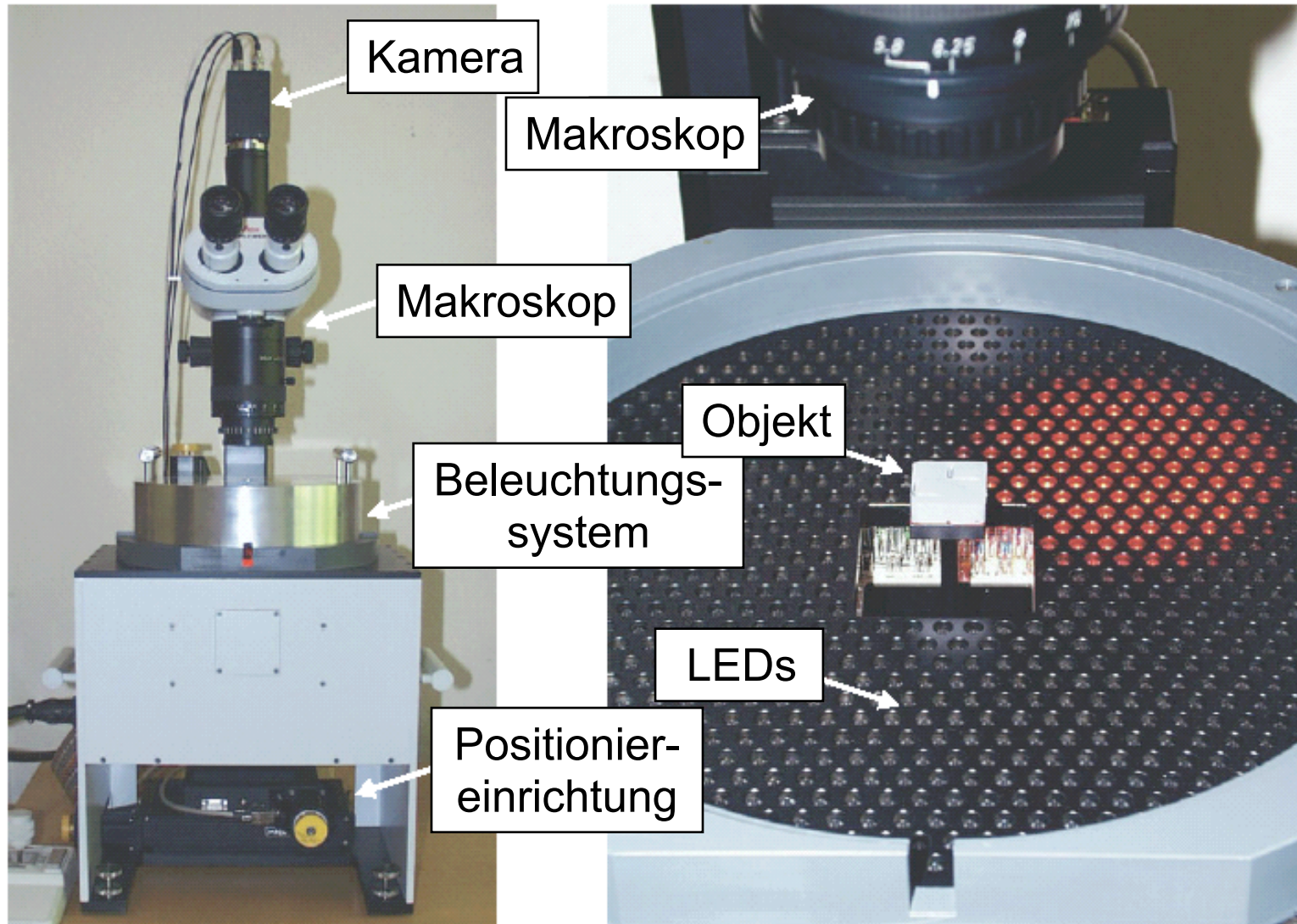
Diffuse Beleuchtung



- + gleichmäßige Ausleuchtung
- geringer Kontrast

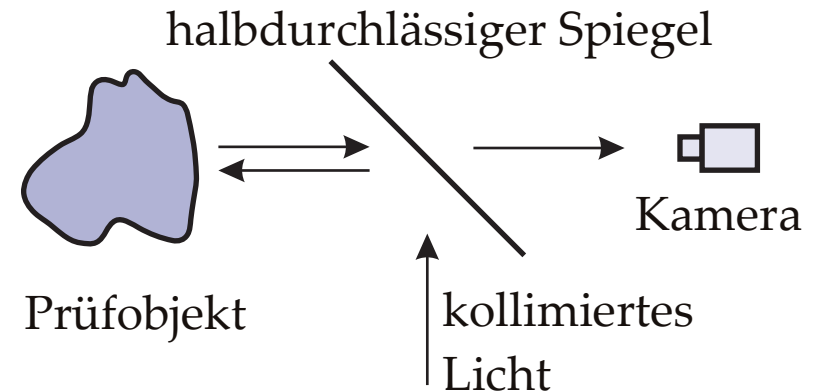
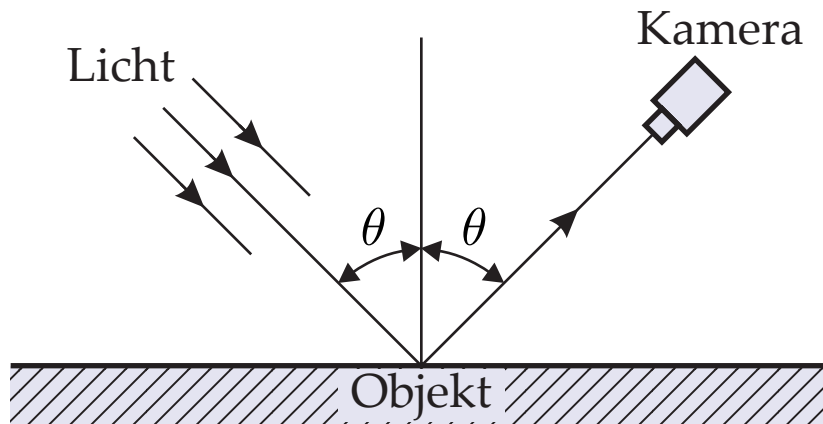
7.2.3.1 Diffuse Beleuchtung

Beispiel: Flexibles Bilderfassungssystem



7.2.3.2 Hellfeldbeleuchtung

- Lichtstrom der Lichtquelle wird direkt in die Kamera gelenkt
- Geeignet zur Erfassung der Reflektanz bei bekannter Objektgeometrie
- Realisierungsmöglichkeiten:
 - Reflexion der Beleuchtung an der Oberfläche des Prüfobjekts
 - koaxiale Beleuchtung durch halbdurchlässigen Spiegel erreichbar
 - Kamera direkt auf Lichtquelle richten → Objektsilhouette (Abschn. 7.3)



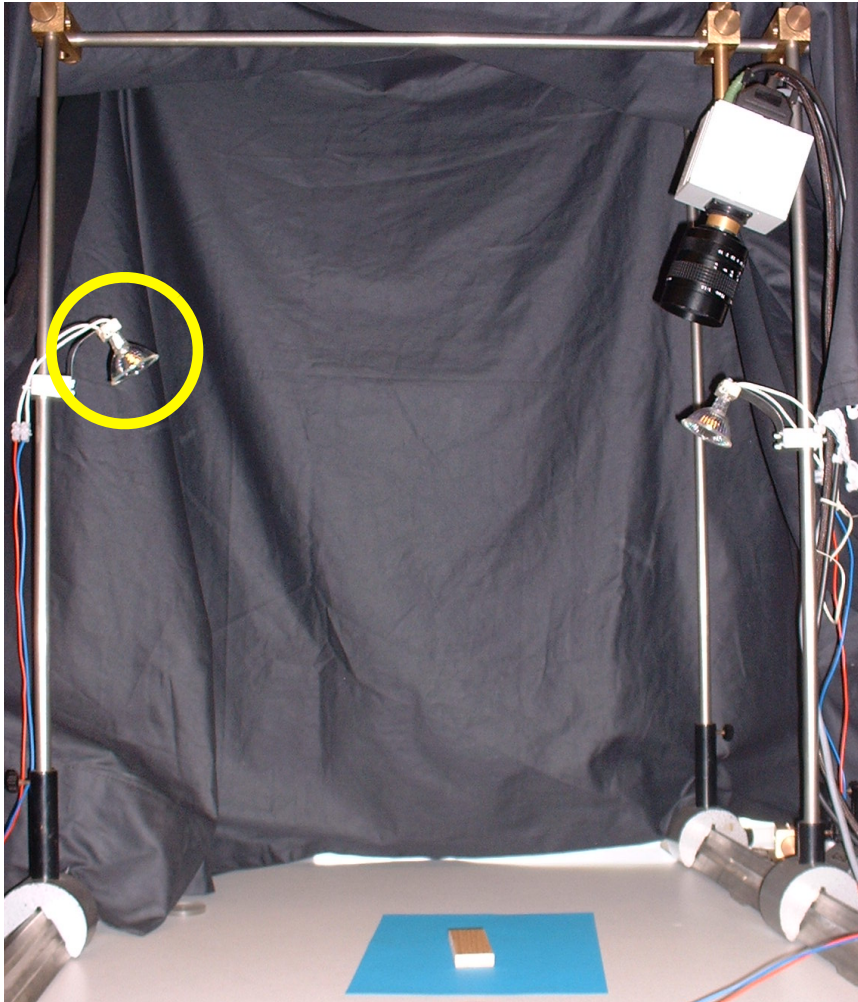
Eigenschaften

+ gute Lichtausnutzung

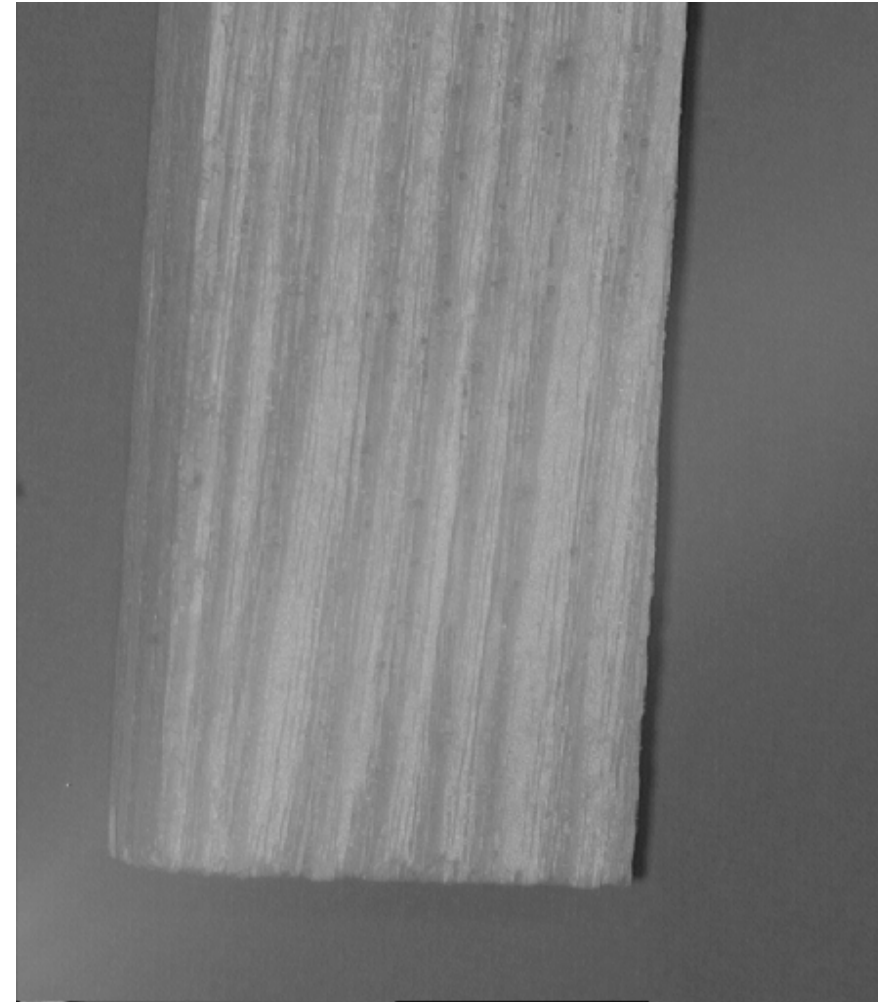
+ schattenfreier Blick in Vertiefungen

7.2.3.2 Hellfeldbeleuchtung

Beispiel: Inspektion von Holzoberflächen



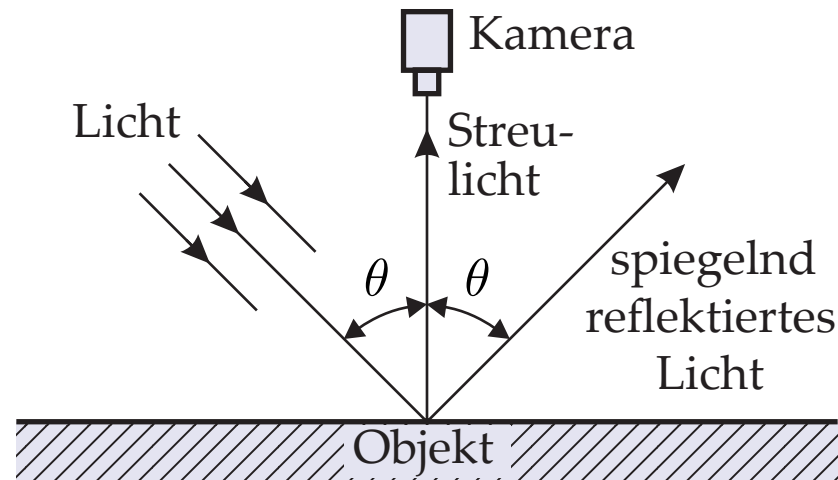
Messaufbau



Hellfeldbeleuchtung

7.2.3.3 Dunkelfeldbeleuchtung

- Lichtstrom der Lichtquelle geht an der Kamera vorbei
- In die Kamera gelangt ausschließlich **Streulicht**
- Bei streifendem Lichteinfall ($\theta \approx 90^\circ$) werden reliefbedingte Oberflächenstrukturen kontrastreich (schattenreich) sichtbar

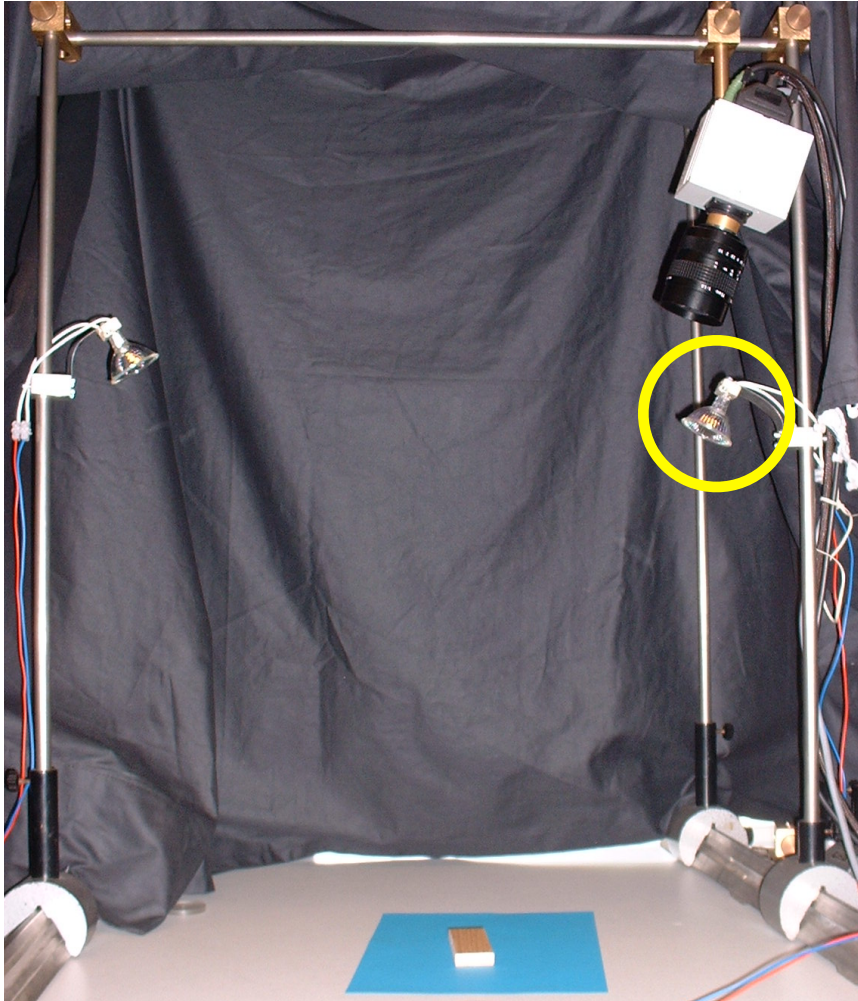


Eigenschaften

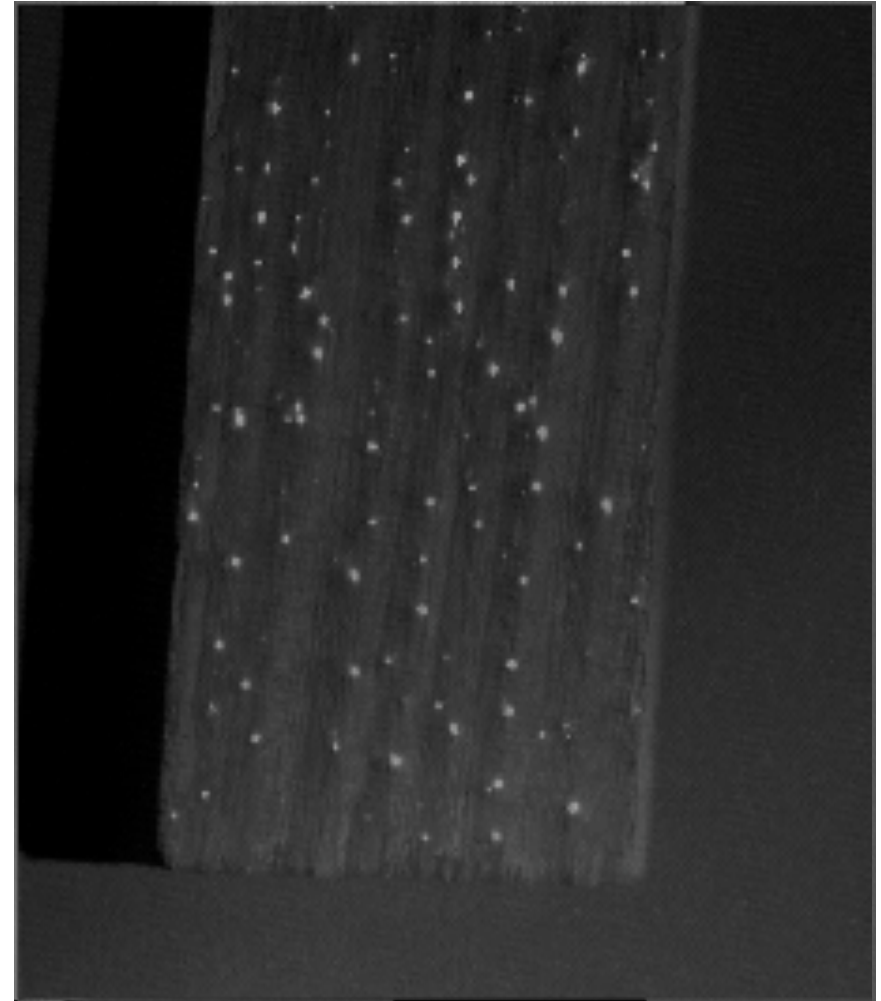
- + Defekte und Abweichungen von der Sollgeometrie erscheinen hell im Bild
→ gut geeignet zur Defekterkennung
- schlechte Lichtausnutzung bei Reflektanzmessung

7.2.3.2 Hellfeldbeleuchtung

Beispiel: Detektion von Lackfehlern auf Holzoberflächen

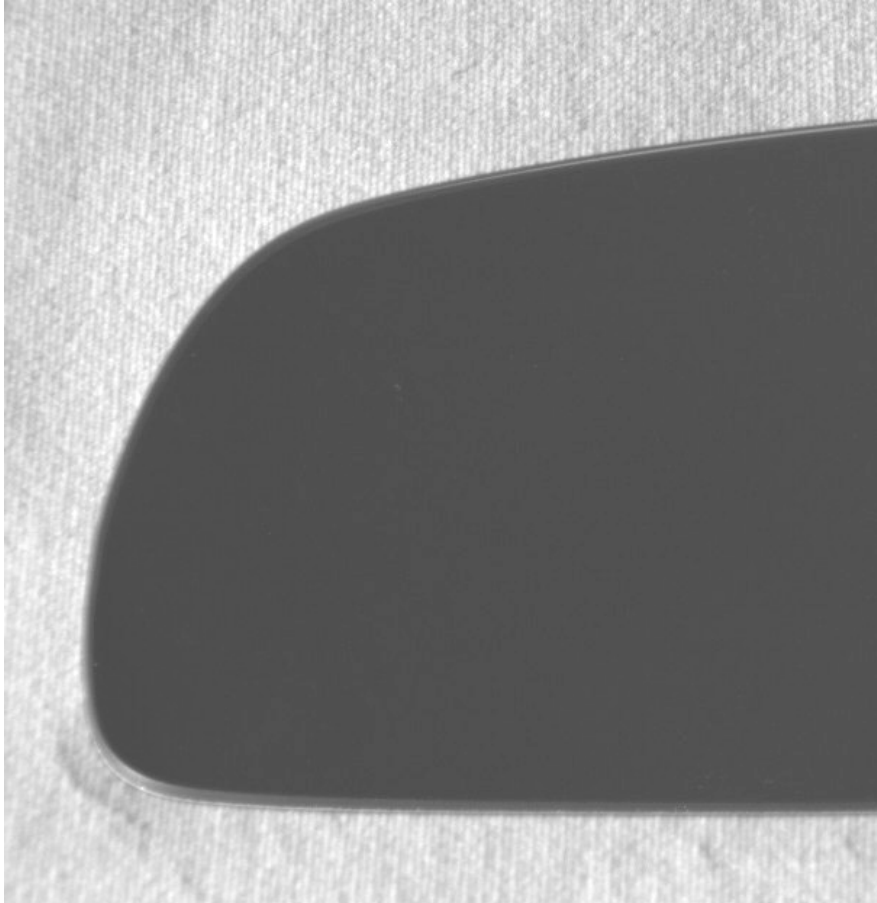


Messaufbau



Dunkelfeldbeleuchtung

Beispiel: Prüfung von Fahrzeugaußenspiegeln



Referenzobjekt

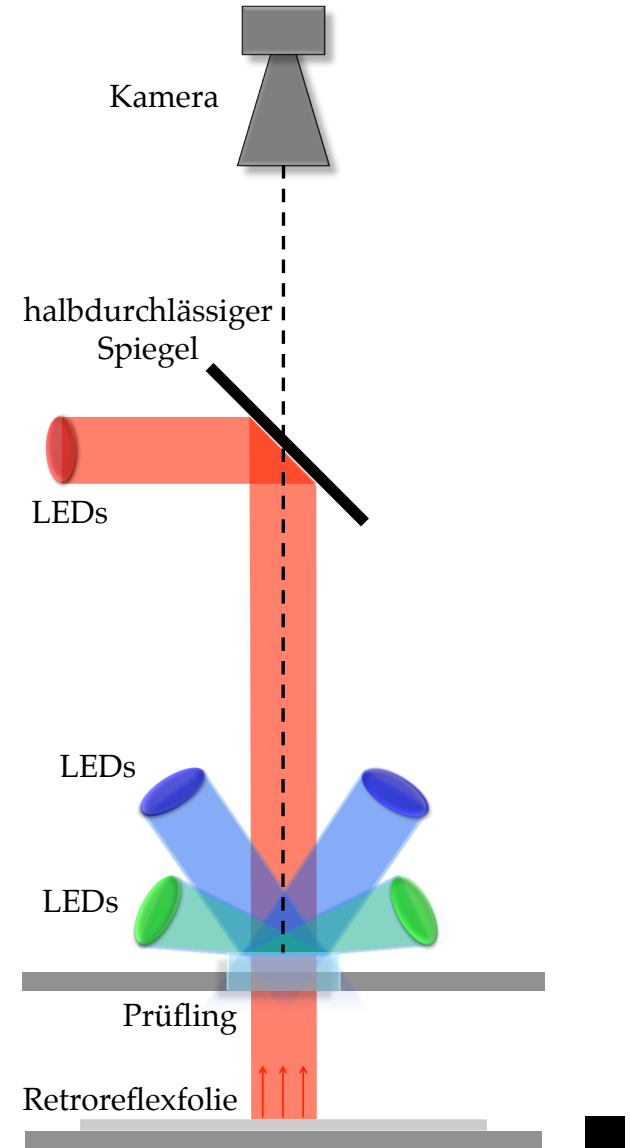
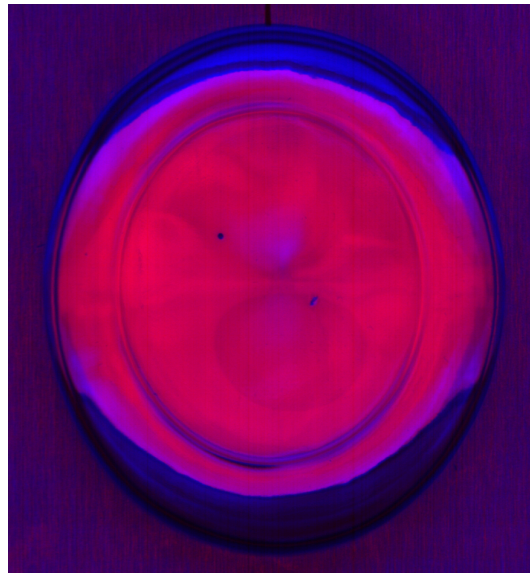


Prüfobjekt mit Kratzern

7.2.3.3 Dunkelfeldbeleuchtung

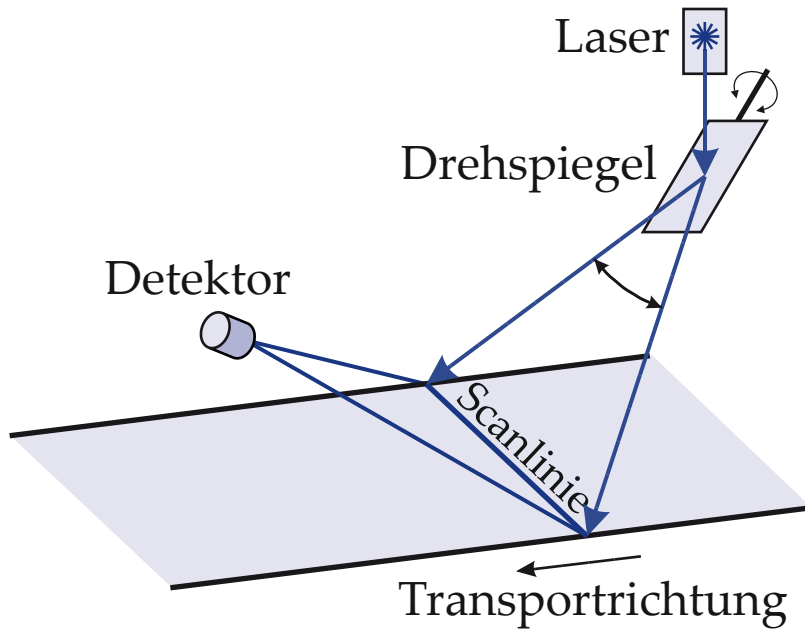
Beispiel: Glasinspektion im Farbmultiplex

- **Rotkanal** (koaxiale Hellfeldbeleuchtung) liefert Transmissionsbild
- **Grünkanal** (streifende Beleuchtung in Dunkelfeldanordnung) macht streuende Partikel auf der Oberfläche sichtbar
- **Blaukanal** (Dunkelfeld) macht Kratzer, Fusseln und Blasen sichtbar

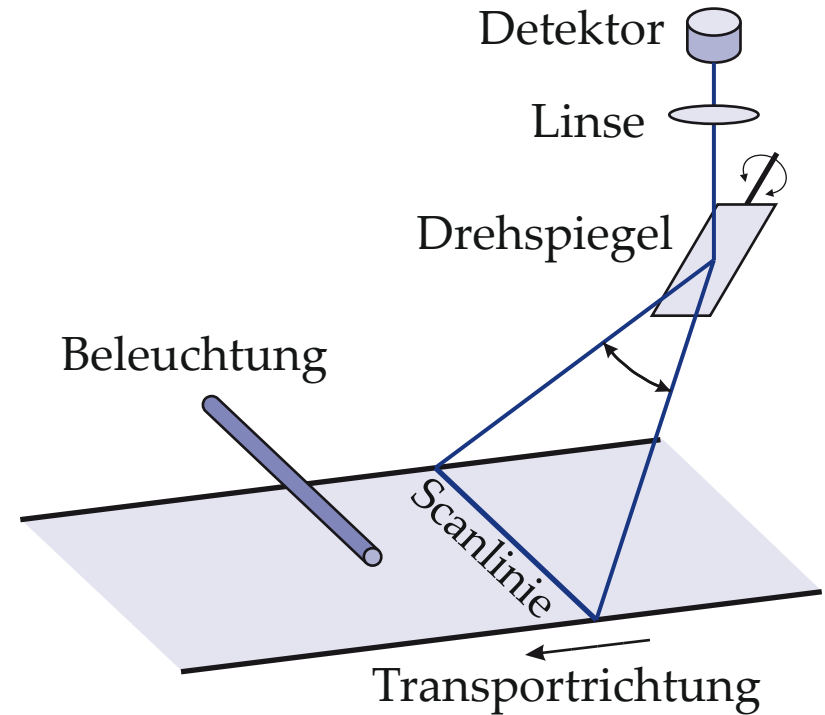


7.2.3.4 Laserscanner

- Laserstrahl wird so abgelenkt, dass eine Linie auf dem Objekt sequentiell beleuchtet wird → ein Punktsensor genügt
- Ablenkung des Laserstrahls erfolgt durch Drehspiegel oder Polygonrad
- Oft benutzt bei Endlosprodukten
- Abtastbedingung nicht konstant entlang der Scanlinie

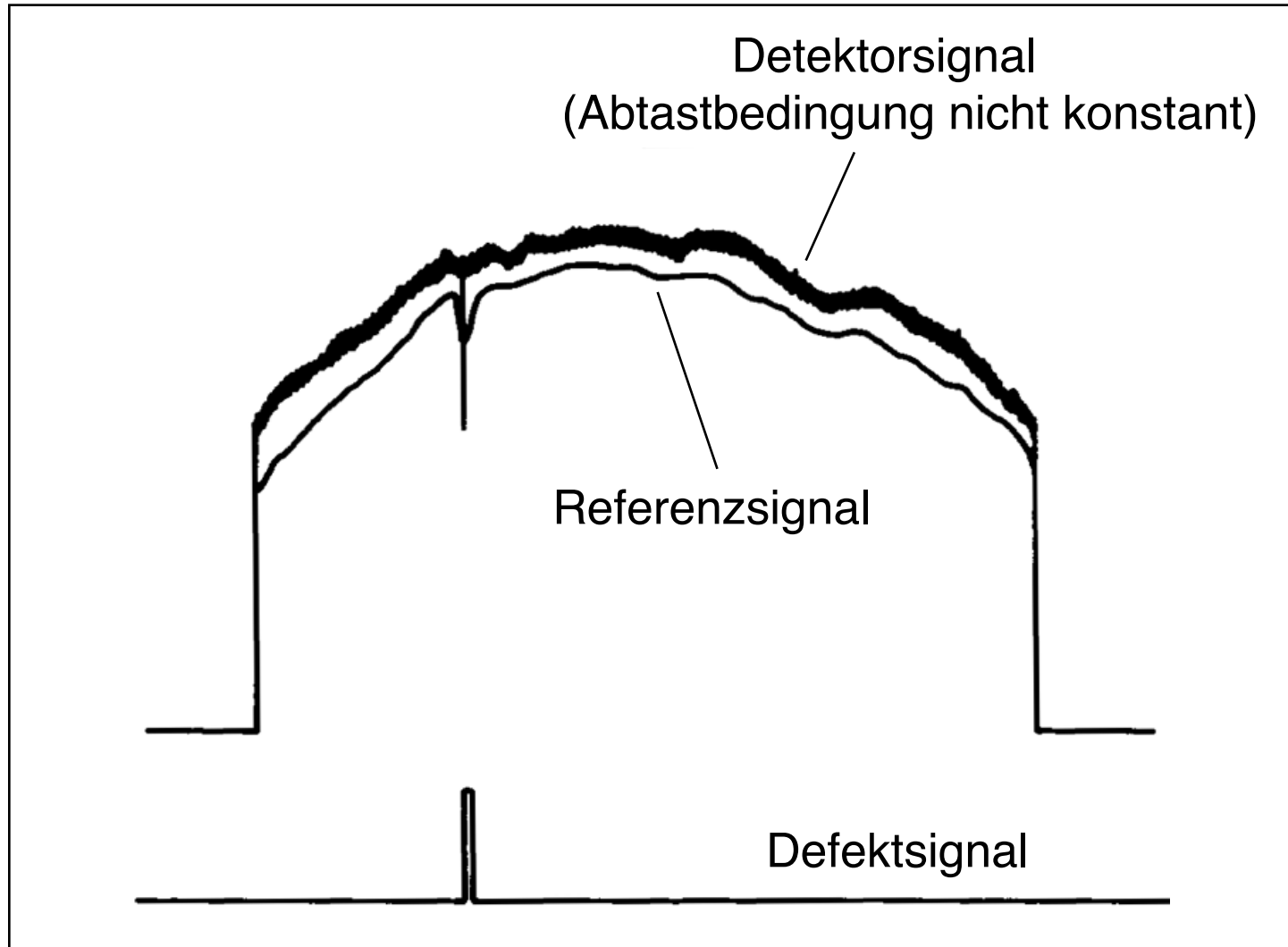


Flying-Spot-Scanner



Flying-Image-Scanner

Beispiel: Defekterkennung bei Endlosprodukten



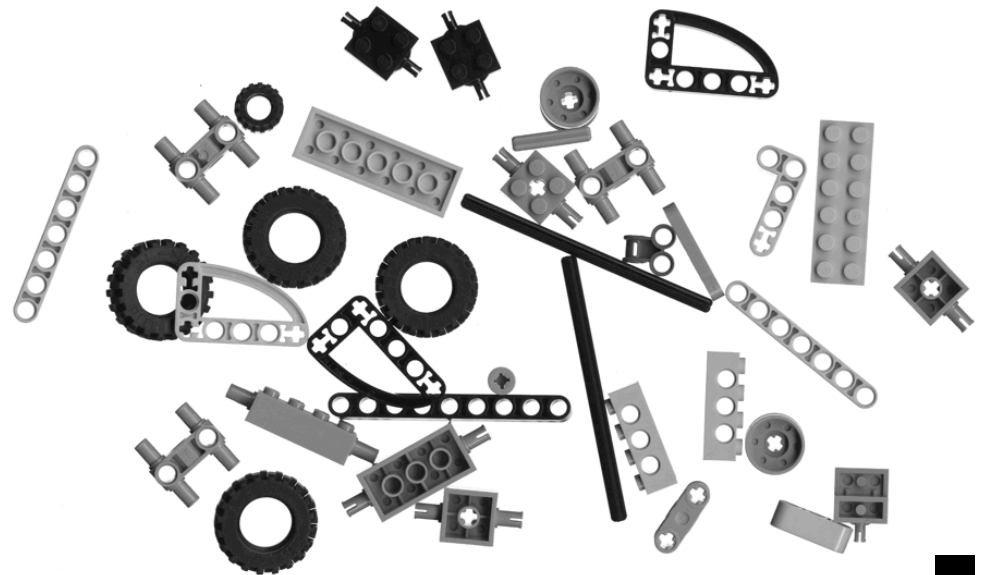
Eigenschaften

- + „helles“, gerichtetes Licht → einfache Realisierung beugungsbegrenzter Systeme (d. h. Größe des Leuchtflecks nur begrenzt durch Beugung, nicht durch geometrische Abbildungsfehler)
- + monochromatisches Licht → Einzellinsen als Objektiv verwendbar
- + hohe Schärfentiefe
- + kleinere bewegliche Elemente → hohe Abtastraten
- + Fremdlichtunterdrückung durch schmalbandige Filter möglich
- + Betrachtung aus mehreren Winkeln durch mehrere kostengünstige Detektoren möglich
- Interferenzerscheinungen (Speckle-Muster)
- keine Erfassung von Farbmerkmalen
- Gefahr durch Einsatz von Laserstrahl (→ Laserschutzverordnung)

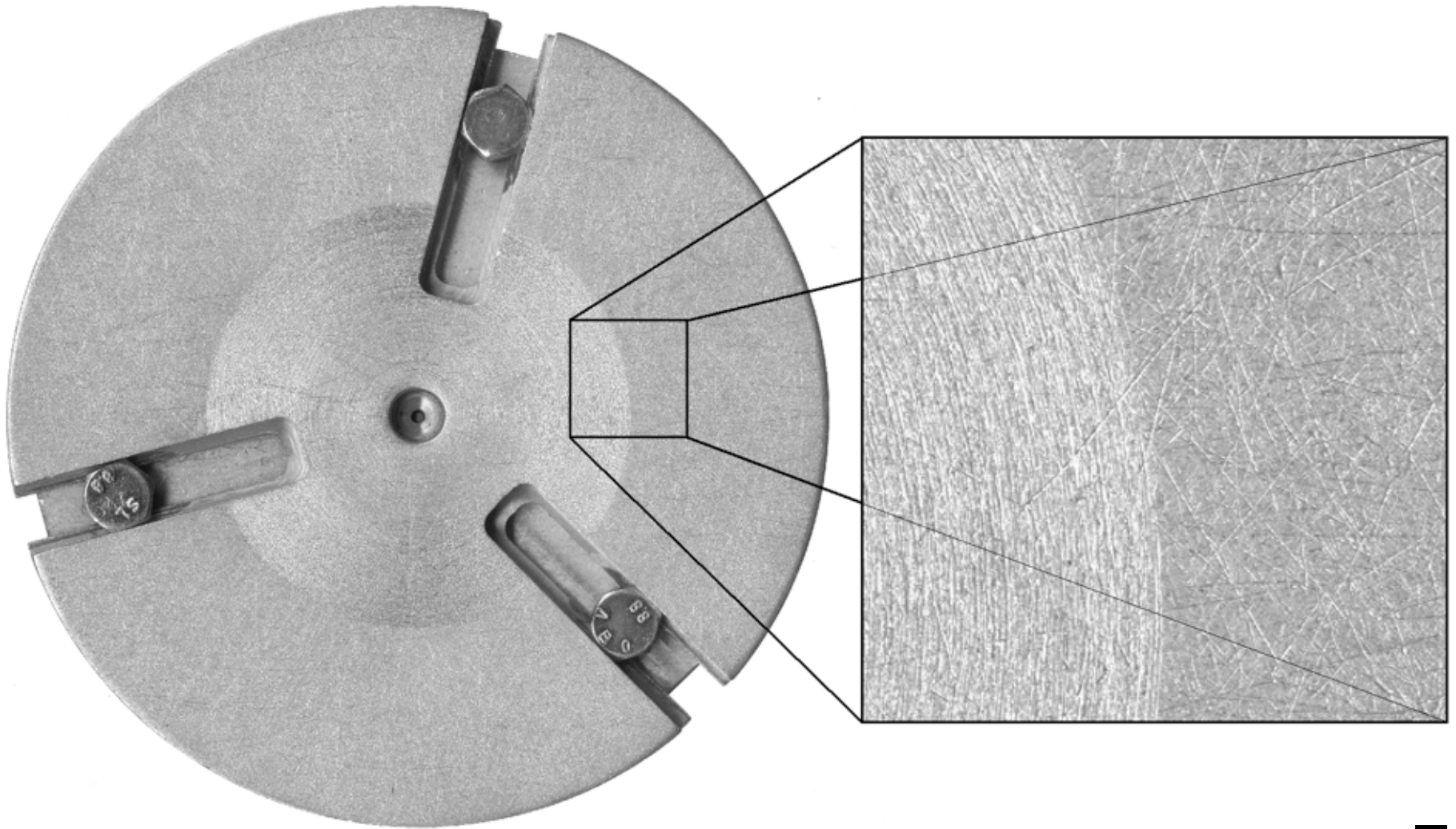
7.2.3.5 Flachbettscanner

- Basiert auf Zeilenkamera, die senkrecht zur Zeilenrichtung bewegt wird
- Geeignet zur Erfassung von Objekten mit Planflächen
- Eigenschaften:
 - Abbildung der Planfläche konstruktiv längentreu (verzerrungsfrei)
 - Auflösung i. d. R. sehr hoch

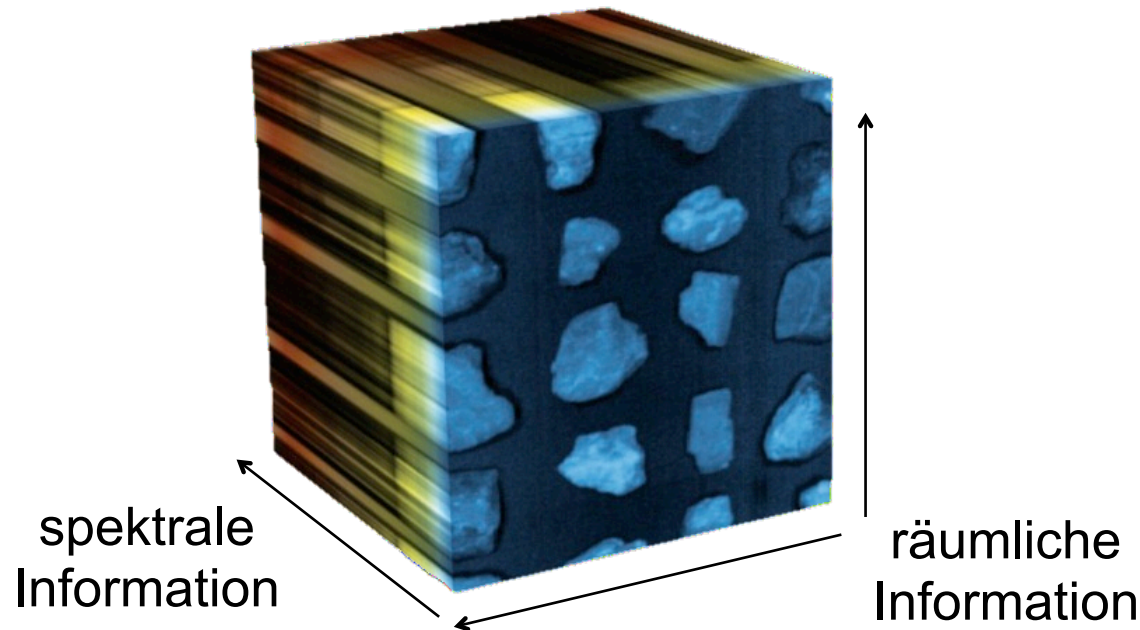
Beispiel: Vollständigkeitsprüfung von Montagebausätzen



Beispiel: Hochauflösende Inspektion von Bauteilen



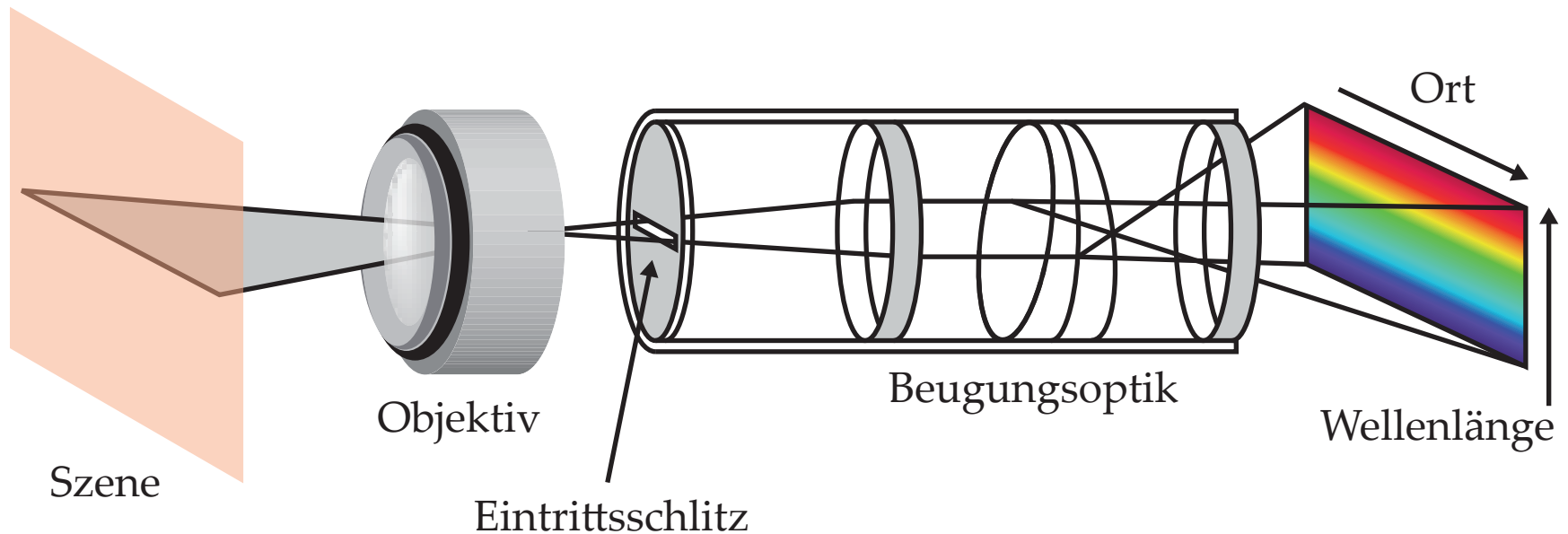
- Manche Anwendungen erfordern eine genauere Auflösung des Spektrums: **3D-Datenwürfel** (zwei örtliche und eine spektrale Dimension)



- Farbkameras konstruktionsbedingt für Spektralmessungen ungeeignet
- Alternativen:
 - Sequentielle Aufnahme mit Spektralfiltern (vgl. Abschn. 5.3)
 - Spektral auflösende Zeilenkamera

Spektral auflösende Zeilenkamera

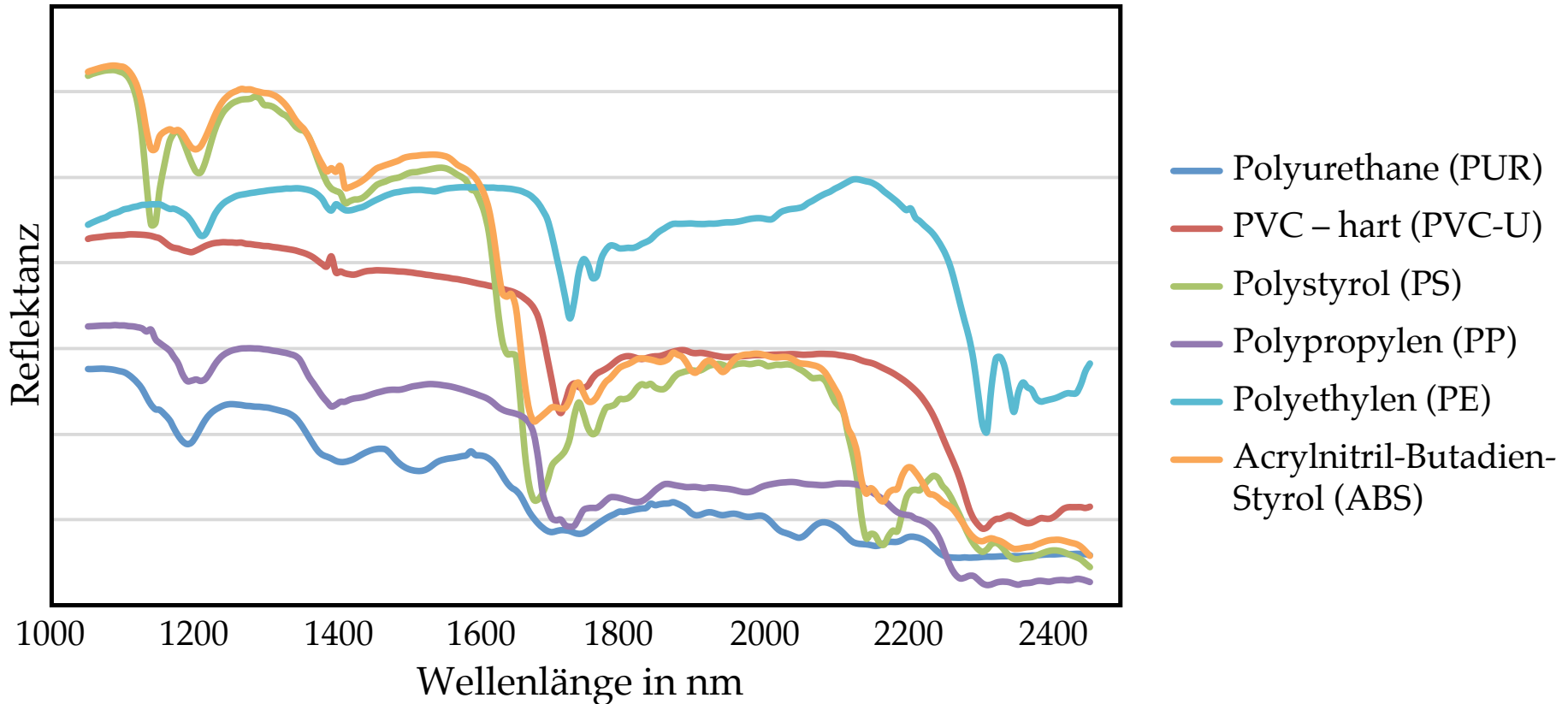
- Beugungsoptik lenkt das Licht wellenlängenabhängig unterschiedlich ab, sodass jede Zeile des Bildsensors einer Wellenlänge zugeordnet ist
- Schlitzeblende stellt sicher, dass nur eine Objektzeile abgebildet wird



- Im resultierenden Bild entspricht eine Koordinate der Wellenlänge und die zweite der lateralen Position des Bildpunkts
- Mittels eines Scanvorgangs lassen sich 2D-Bilder gewinnen

Anwendungsbeispiel: Kunststoffsortierung anhand des NIR-Spektrums

- Klassifikation atomarer Stoffe mittels NIR-Spektrum nicht möglich, da Anregungszustände bei höheren Energien (kürzeren Wellenlängen) liegen



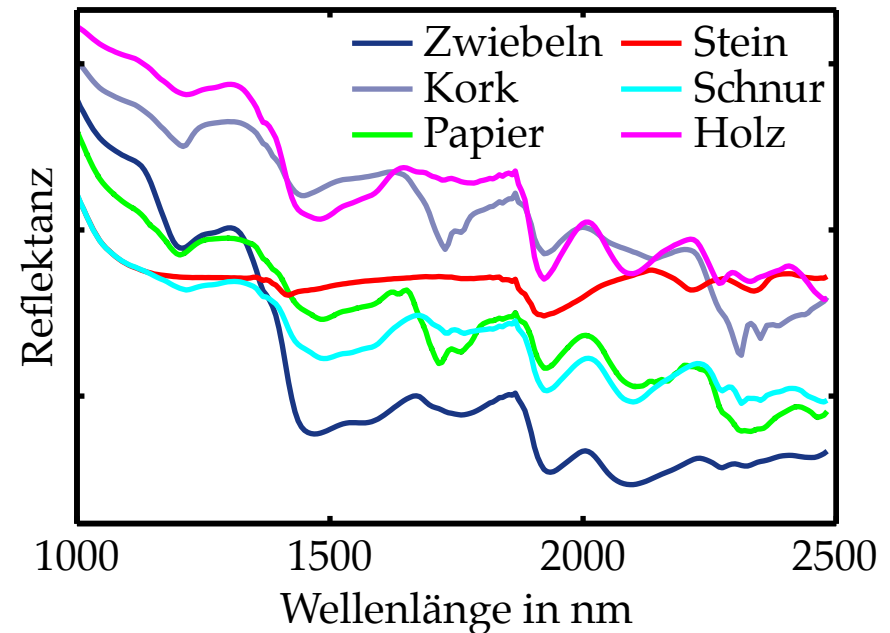
Mittlere Punktspektren verschiedener Kunststoffe

Beispiel: Hyperspektrale Sortierung von Lebensmitteln

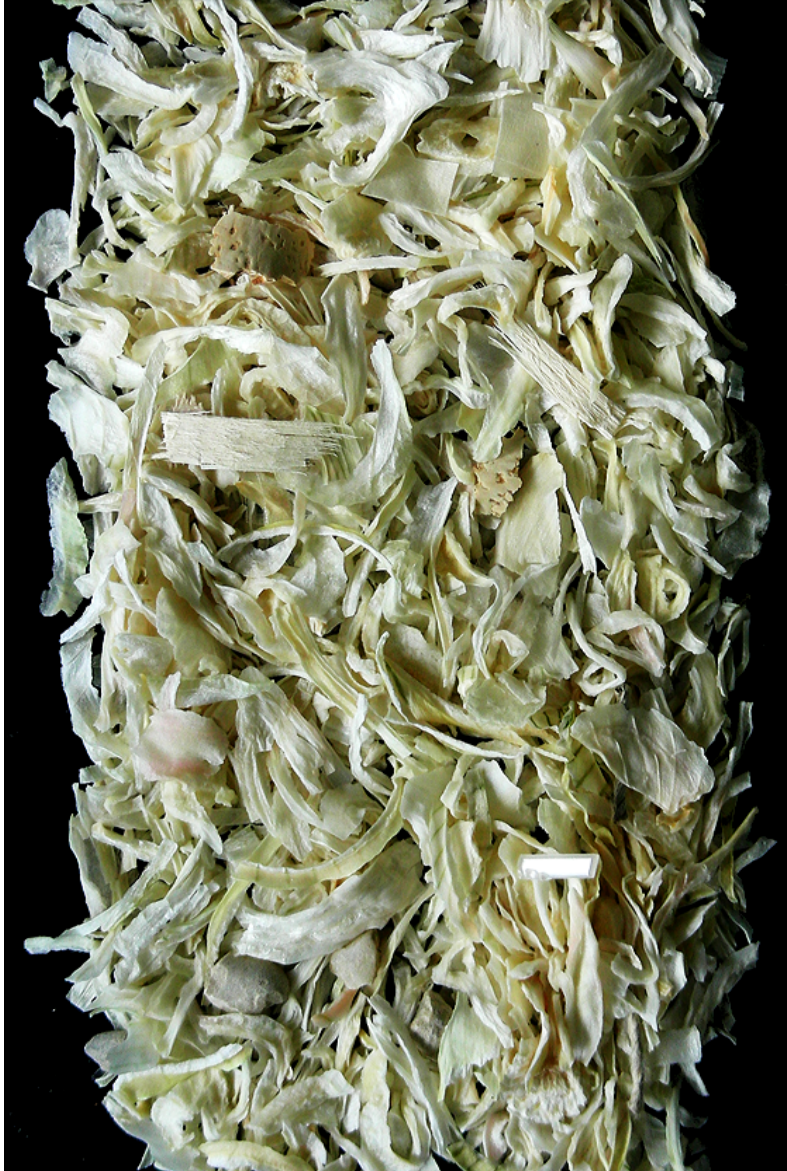
- Trennung getrockneter Zwiebeln von Fremdmaterialien wie Steinen oder Verpackungsmaterial (Holz, Papier, Steine usw.)
- In bestimmten Wellenlängenbereichen sind die Unterschiede zwischen den NIR-Spektren von Zwiebeln und Fremdmaterialien besonders ausgeprägt, was zur Klassifikation herangezogen werden kann



RGB-Aufnahme



Mittlere Punktspektren



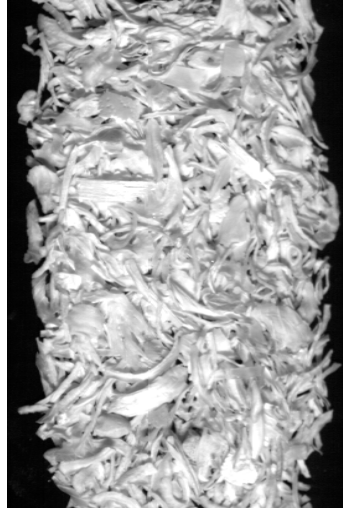
Automatische Sortieranlage

RGB-Aufnahme einer zu klassifizierenden
Zwiebel-Probe mit Fremdmaterialien

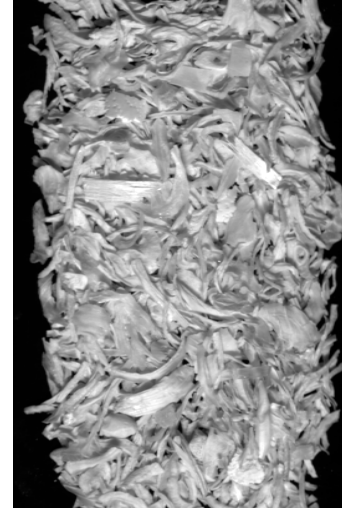
7.2.4 Spektralsensoren



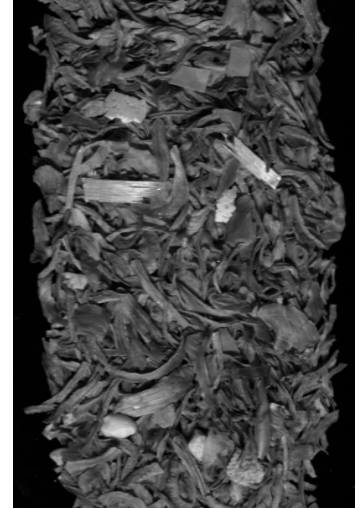
RGB-Bild



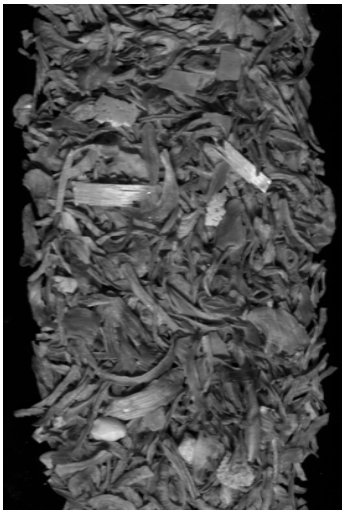
$\lambda = 1064 \text{ nm}$



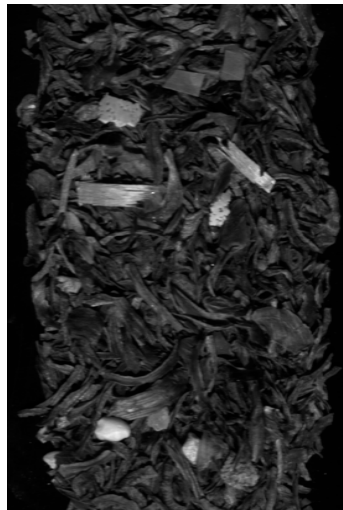
$\lambda = 1318 \text{ nm}$



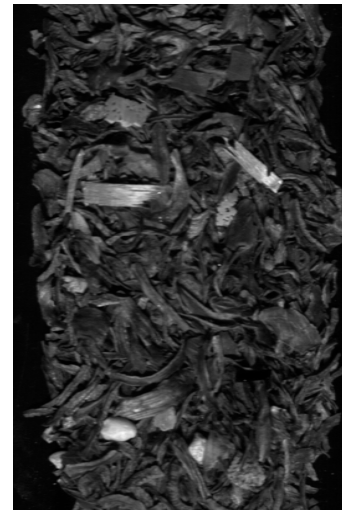
$\lambda = 1572 \text{ nm}$



$\lambda = 1826 \text{ nm}$



$\lambda = 2081 \text{ nm}$

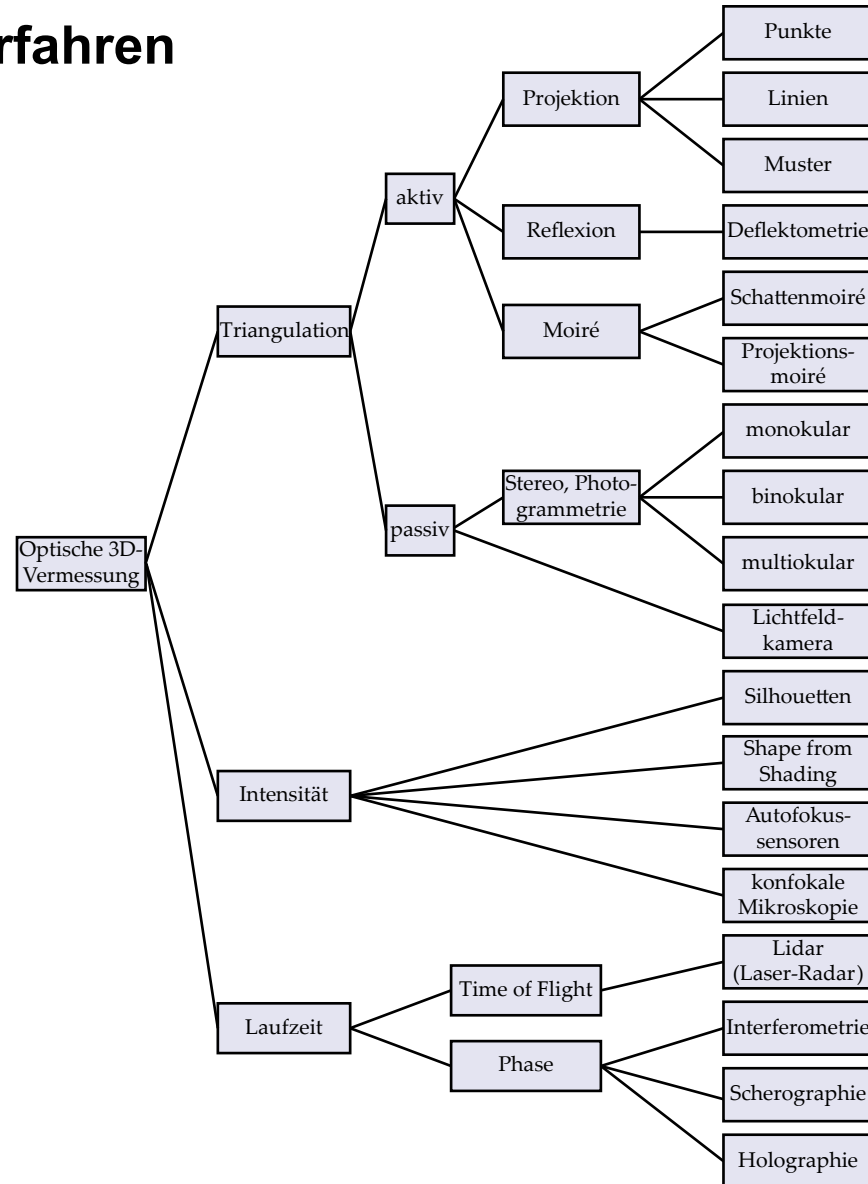


$\lambda = 2335 \text{ nm}$

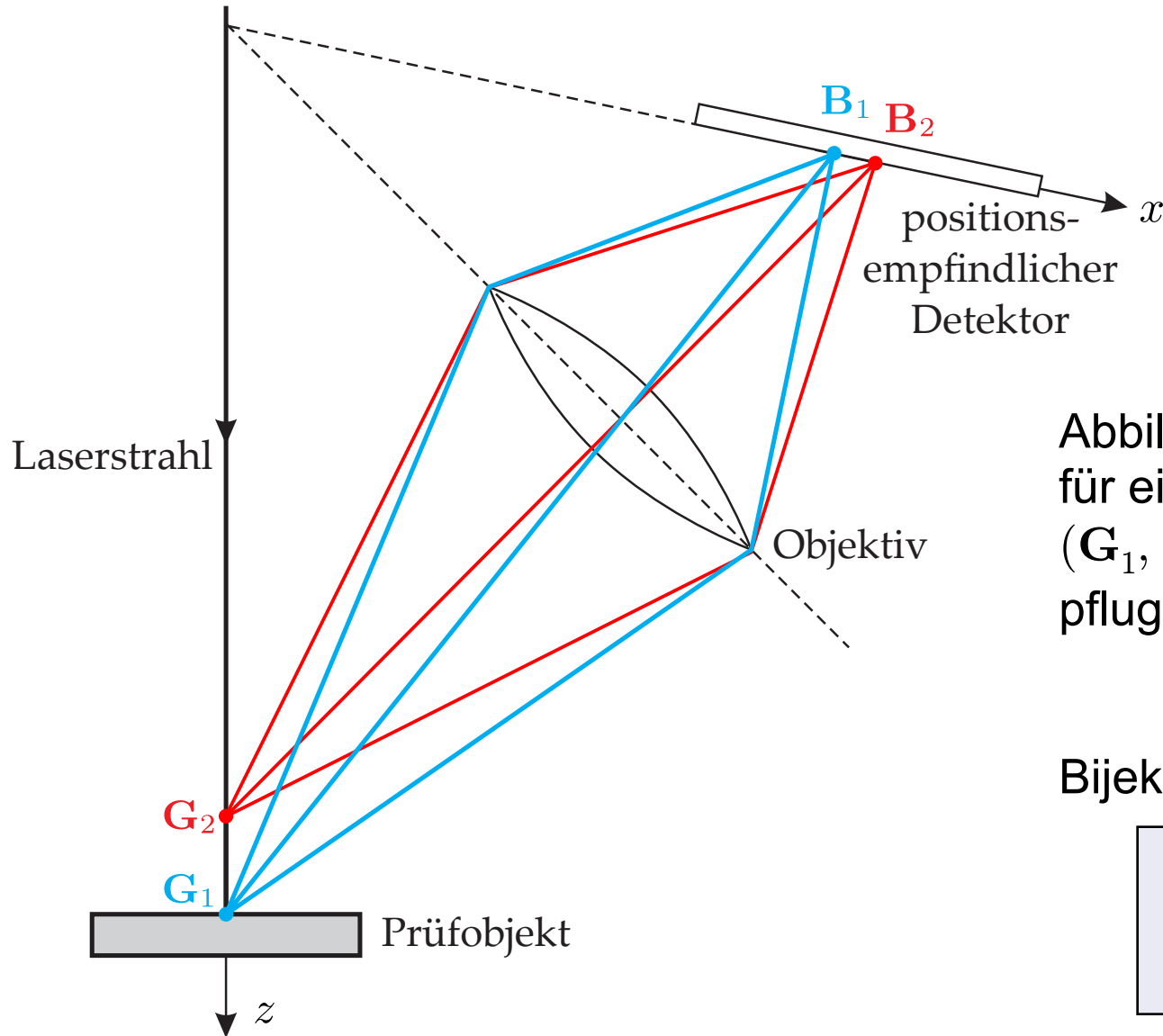


Falschfarben 

Systematik der Verfahren zur 3D-Erfassung



7.3.1 Triangulation (punktuelle Abtastung)



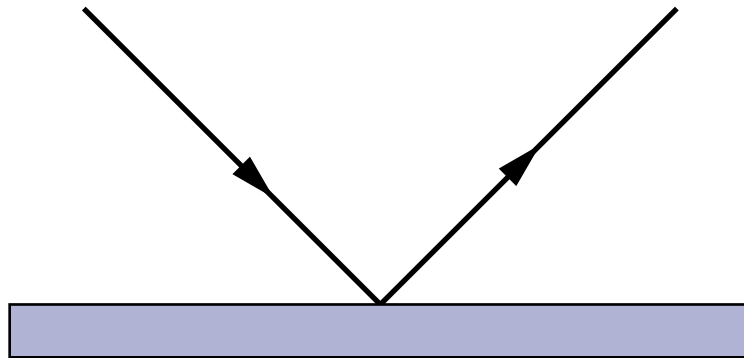
Abbildungsgleichung für ein Punktepaar (G_1, B_1) sowie Scheimpflugbedingung erfüllt!

Bijektive Abbildung A :

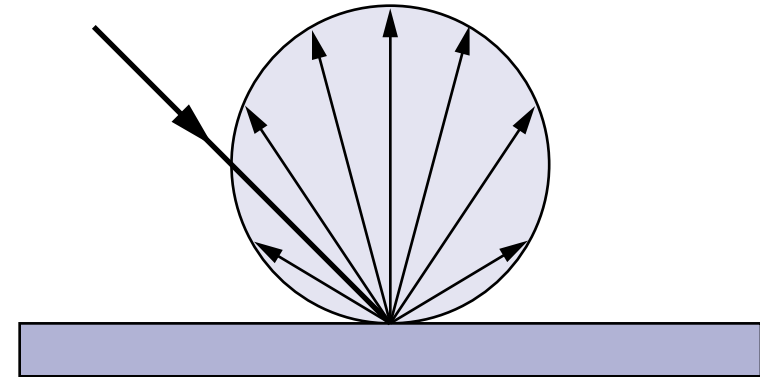
$$z \mapsto x = A(z)$$
$$z = A^{-1}(x)$$

7.3.1 Triangulation (punktuelle Abtastung)

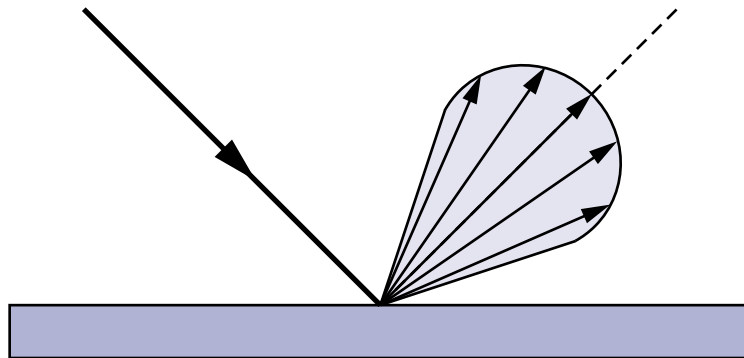
- **Voraussetzung:** Oberfläche des Objekts kein idealer Spiegel; ein Teil des Lichtes muss in das Objektiv gestreut werden



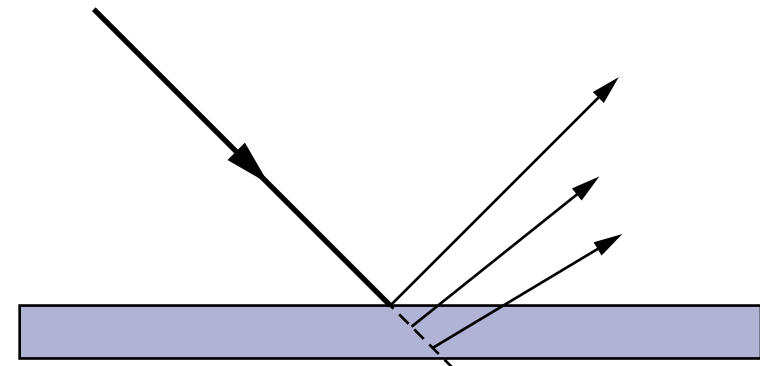
perfekt spiegelnde Reflexion



Lambert'sche Streuung



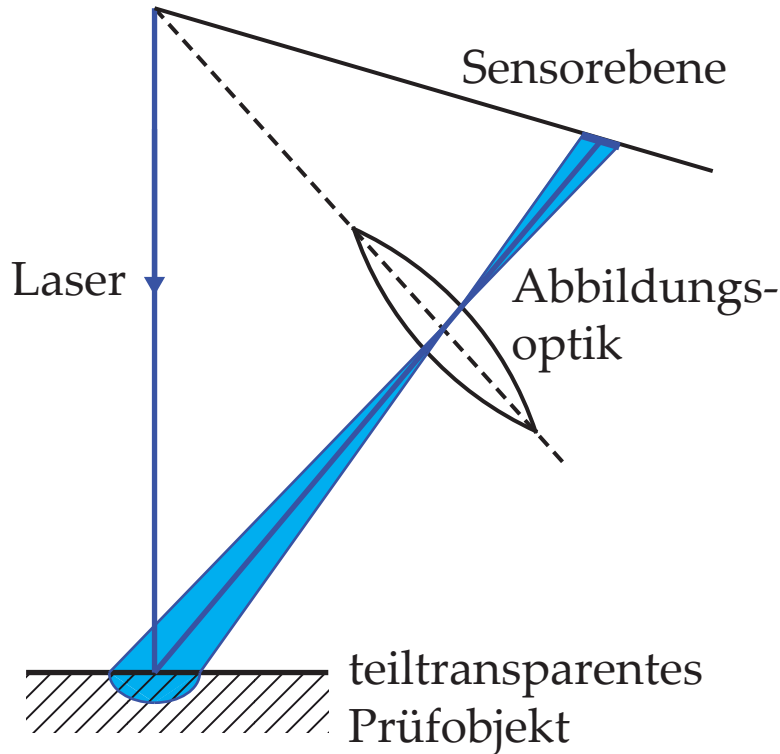
schwach spiegelnde Reflexion



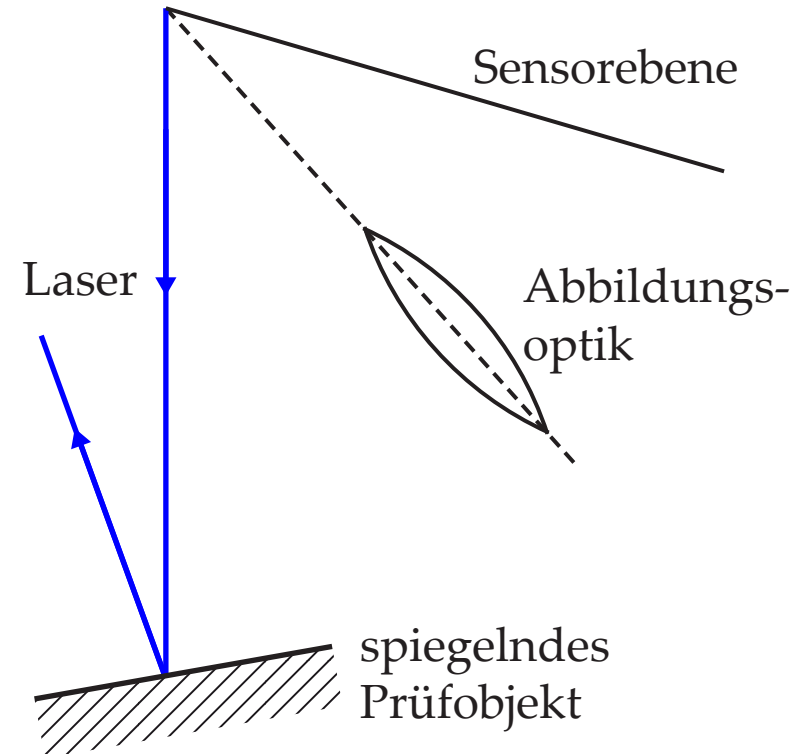
Volumenstreuung

Streueigenschaften von Objekten

Mögliche Problemfälle bei der Triangulation eines Objektpunkts

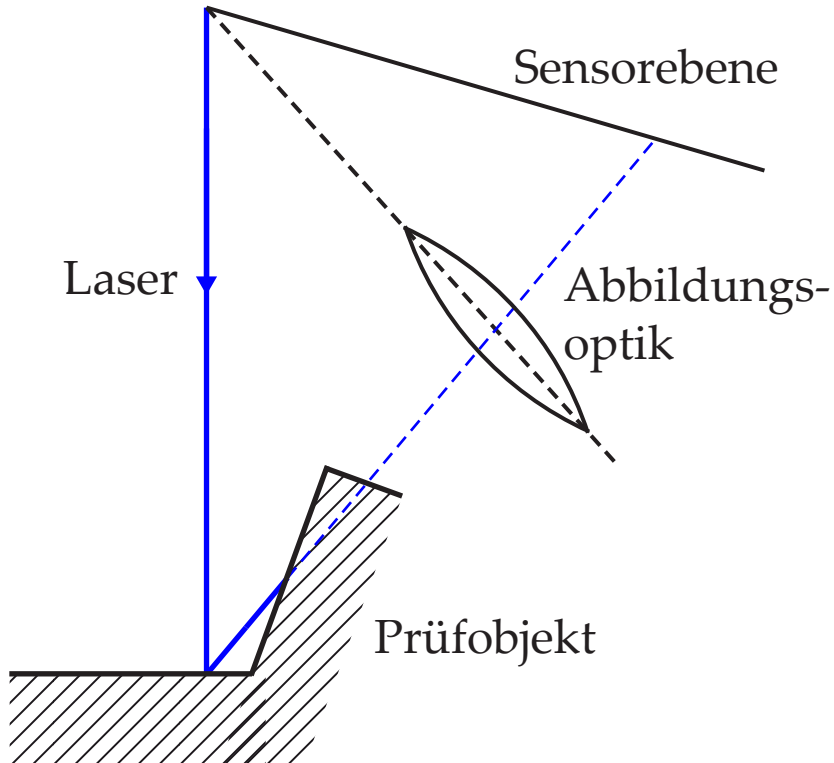


Aufweitung des Lichtpunktes durch teiltransparentes Objekt

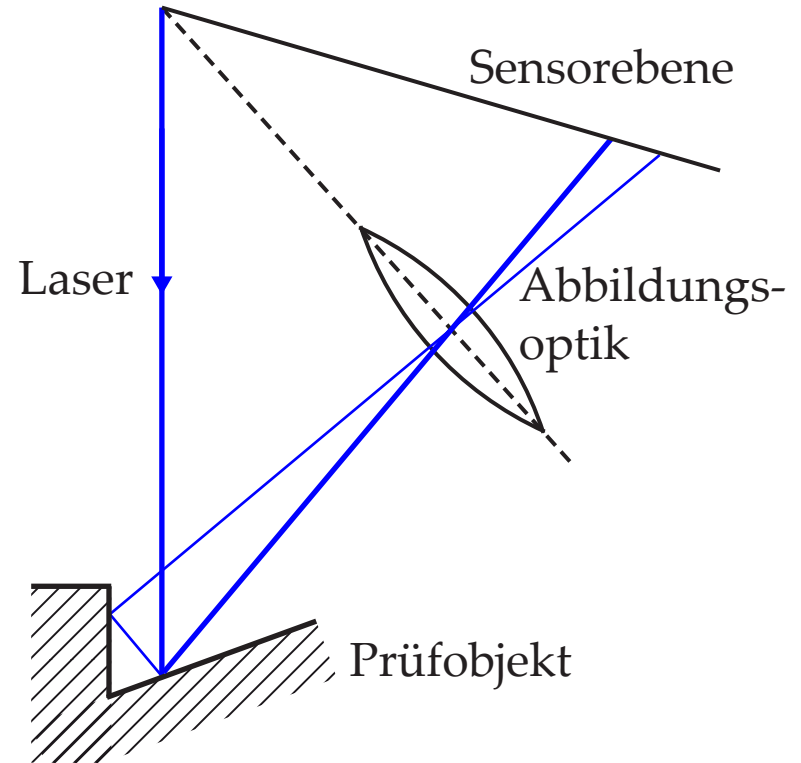


Bei perfekt spiegelnden Objekten gelangt kein Licht auf den Detektor

Mögliche Problemfälle bei der Triangulation eines Objektpunkts



Objektform verursacht Abschattung des Beobachtungsstrahlengangs



Mehrfachreflexionen am Objekt bewirken zusätzliche Bildpunkte

Eigenschaften

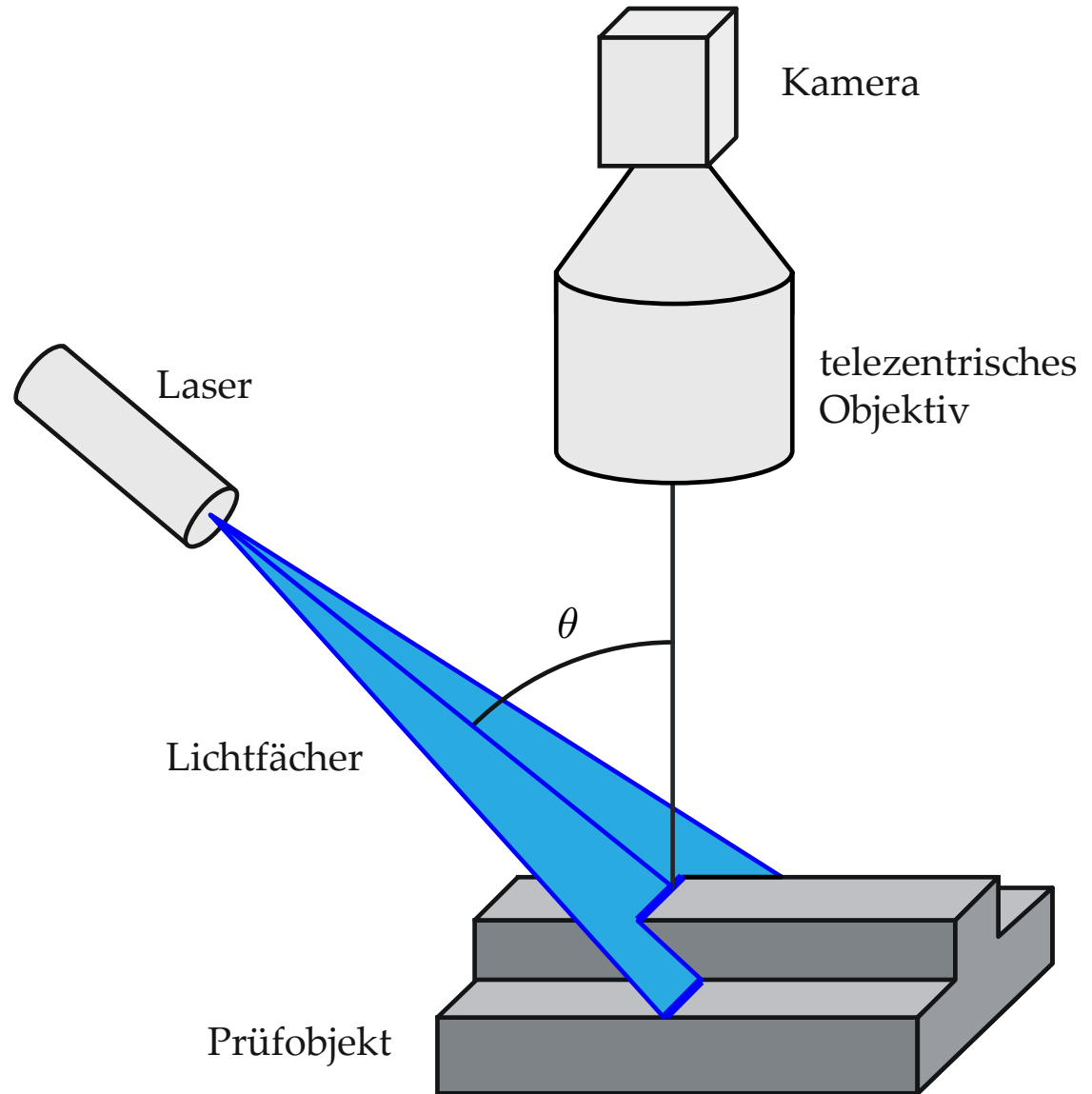
- + liefert Tiefeninformation $z(\mathbf{x})$ (Relief)
- + unabhängig von Reflektanz und Farbe des Objekts (bis auf die o. g. Voraussetzungen)
- + Tiefenauflösung bis ca. 2 μm
- Tiefenauflösung schlechter bei nicht ideal opaken Prüflingen
- punktuelle Abtastung der Oberfläche
- Probleme bei Verdeckungen

Sensoren

- CCD-Zeilenkamera
- PSD (*position sensitive detector*)

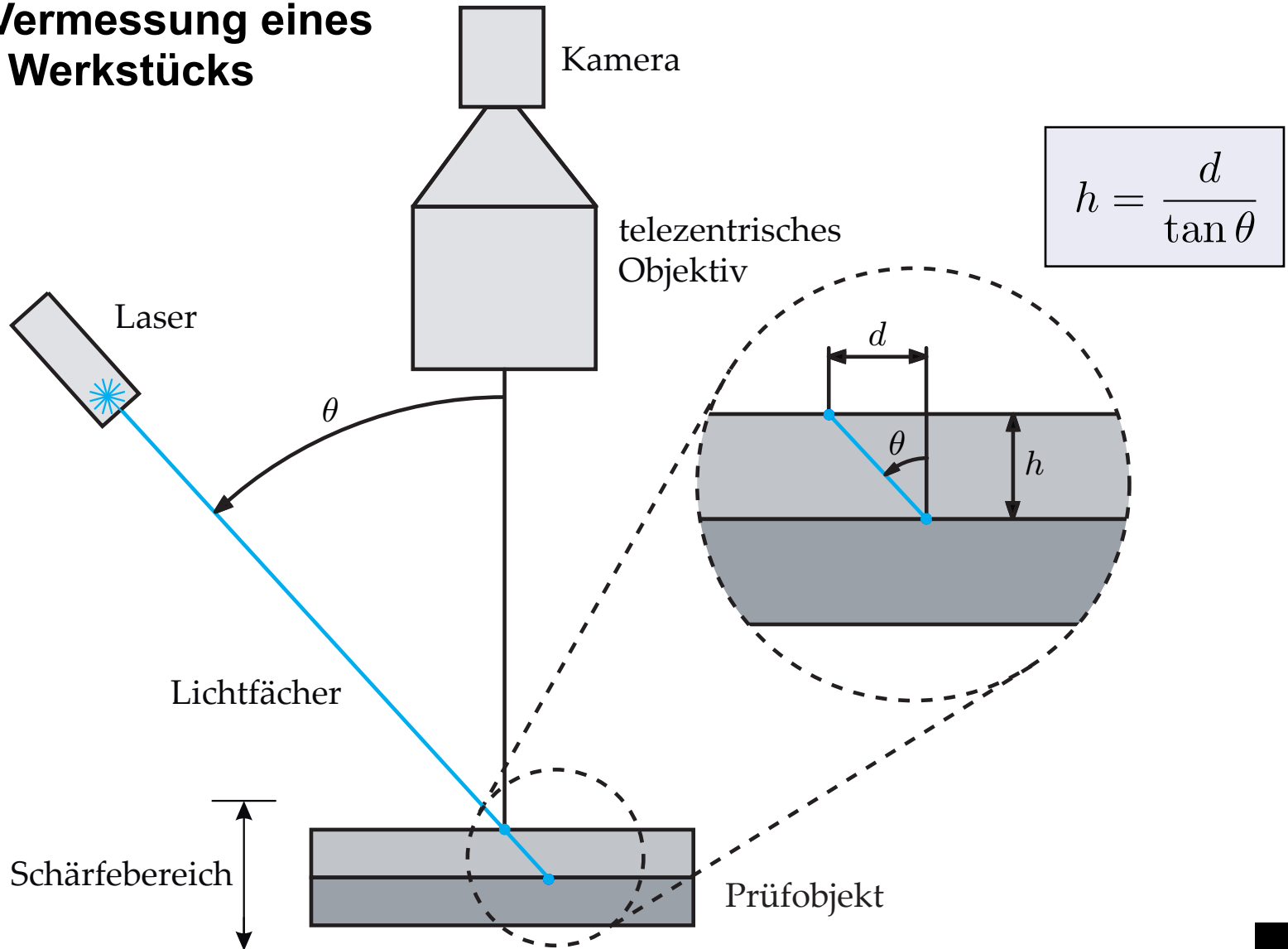
Prinzip

- Beleuchtung des Objekts mit ebenem „Lichtfächer“
- triangulatorische Auswertung (für alle Punkte der auf dem Objekt erscheinenden „Lichtlinie“)
→ **1D-Relief** $z(x)$
- 2½D-Objekterfassung durch Relativbewegung von Sensor oder Prüfobjekt senkrecht zur Lichtschnittlinie



7.3.2 Lichtschnittverfahren (Linienabtastung)

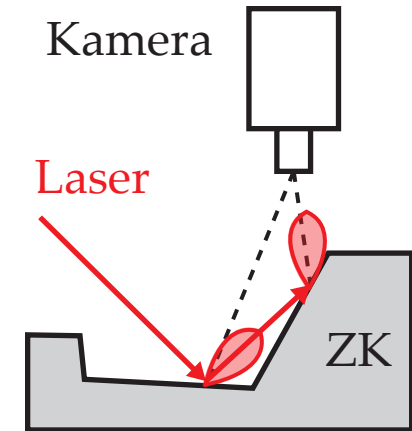
Beispiel: Vermessung eines einfachen Werkstücks



7.3.2 Lichtschnittverfahren (Linienabtastung)

Beispiel: 3D-Erfassung eines Zylinderkopfes

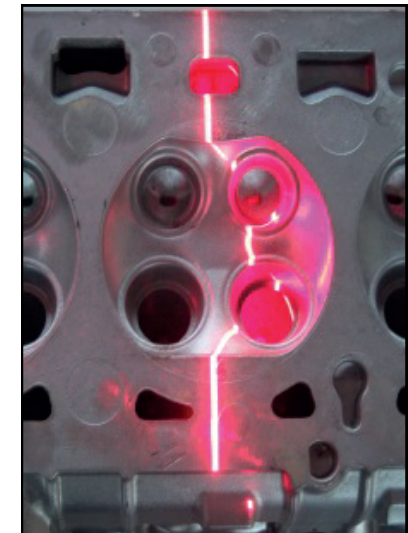
- Beleuchtung mit fächerartig aufgeweitetem Laser
- Licht wird schwach spiegelnd reflektiert
- triangulatorische Auswertung



Aufnahmeanordnung



Zylinderkopf



Aufnahme

7.3.3 Messunsicherheit der Triangulation

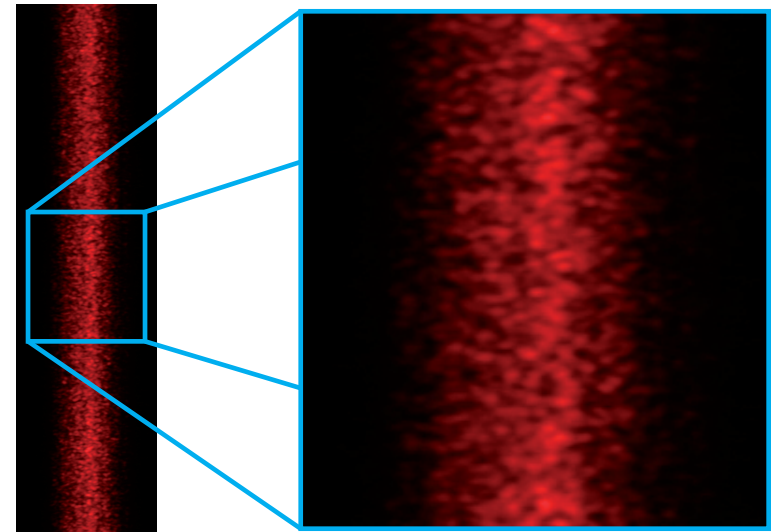
- Man unterscheidet zwischen lateraler und vertikaler **Messunsicherheit**
- Messunsicherheit sämtlicher 3D-Messverfahren mit aktiver Beleuchtung ist durch folgende Faktoren nach unten begrenzt:

- Abbildungsqualität der Musterprojektion
 - Abbildungsqualität der Aufnahmeoptik zur Abbildung des verzerrten Musters
- } ideal: Einsatz beugungs-
begrenzter Optiken
(Beugung → syst. Fehler)

- Sensorauflösung
- bei PSD-Sensoren keine Ortsdiskretisierung

- **Speckle** aufgrund der Kohärenz des Lichtes (manifestiert sich als multiplikatives Rauschen)
- stoch. Fehler

Hersteller von Triangulationssensoren geben oft nur die Sensorauflösung an; die Messunsicherheit ist meist größer

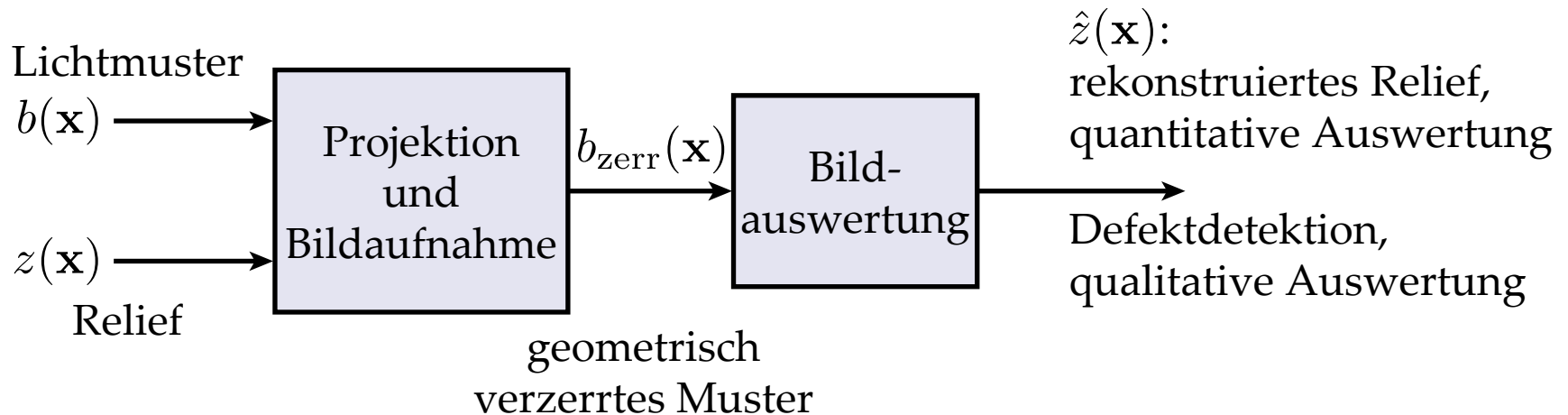


Ziel

- Erfassung des Oberflächenreliefs $z(\mathbf{x})$

Vorgehensweise

- Projektion eines inhomogenen Lichtmusters (Beleuchtungsstruktur) auf Oberfläche des Prüfobjektes



Relief $z(\mathbf{x})$ bewirkt eine geometrische Verzerrung der aufprojizierten Beleuchtungsstruktur $b(\mathbf{x})$

Spezialfälle

- Triangulation, Lichtschnittverfahren, Streifenprojektion, Moiréverfahren...

Gemeinsamkeit

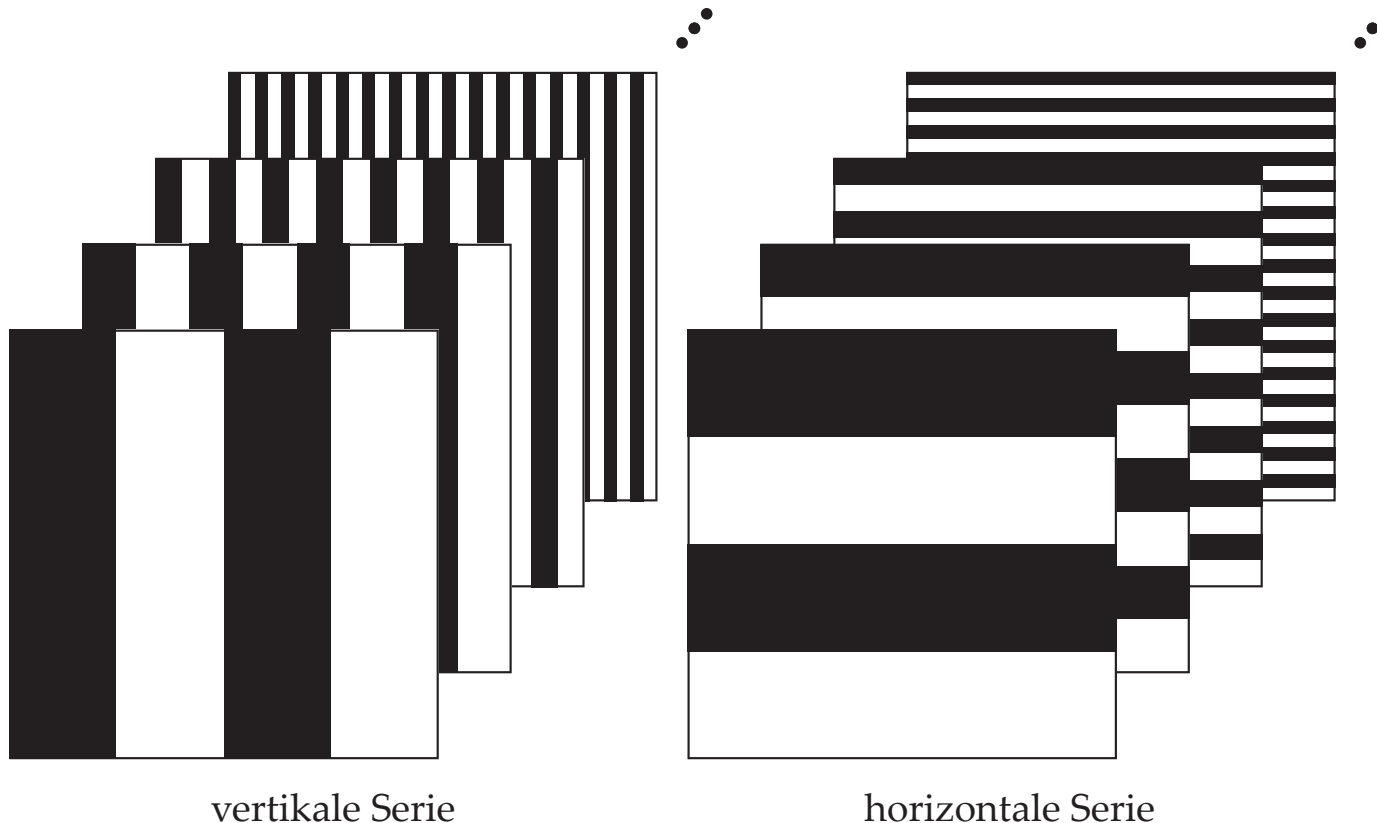
- Relief $z(\mathbf{x})$ beeinflusst Strahlverlauf*
 - Verfahren mit strukturierter Beleuchtung daher weitgehend unabhängig** von den optischen Eigenschaften (Farbe, Reflektivität, Streuverhalten) der Oberfläche

*) Dass dies so ist, kann man sich am besten bei Verwendung einer Lochkamera klarmachen.

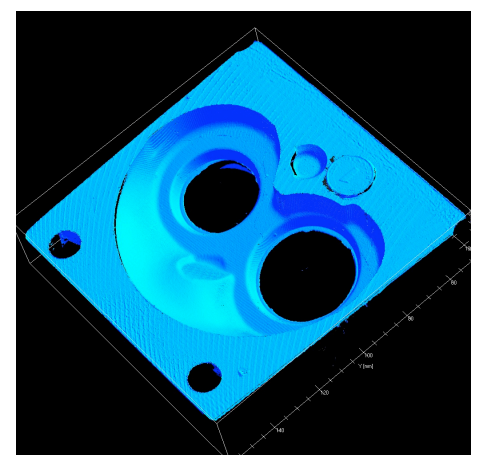
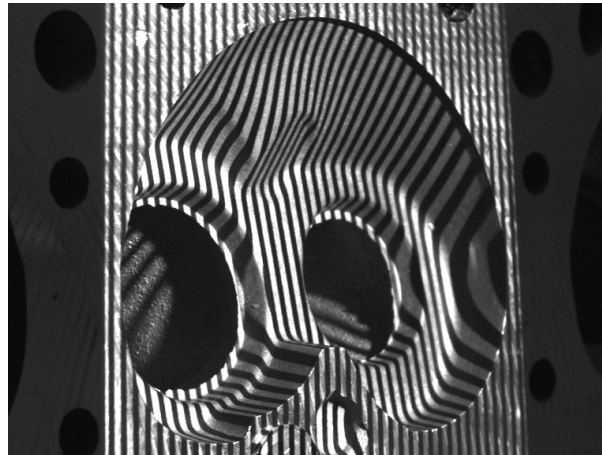
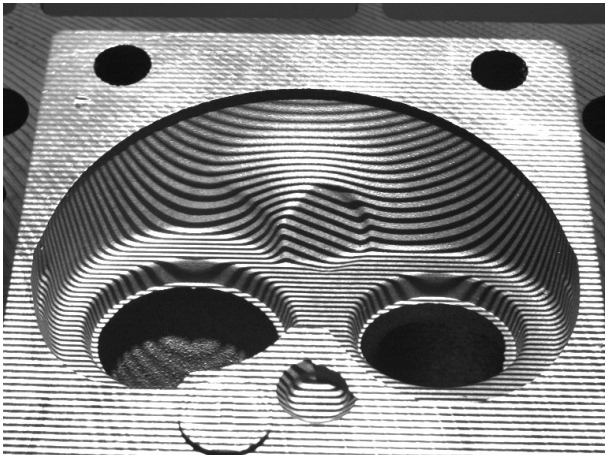
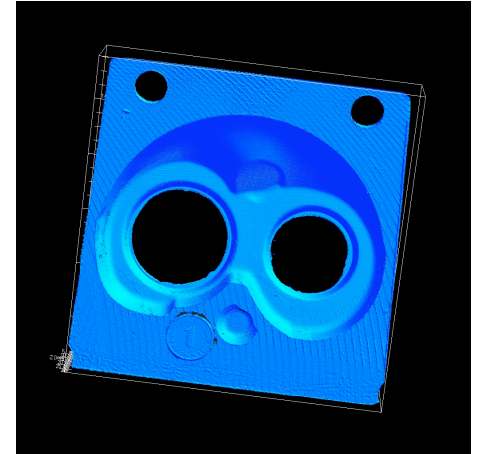
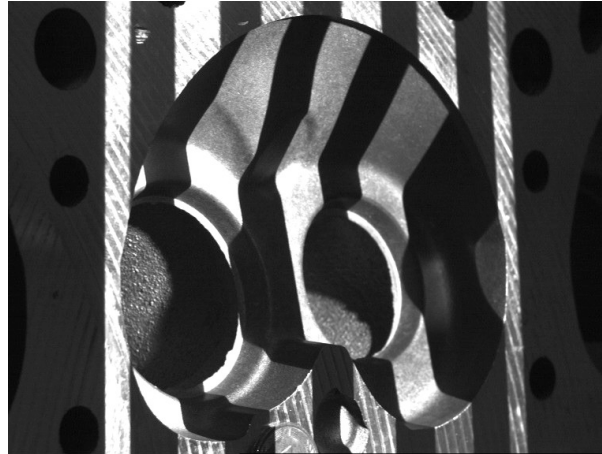
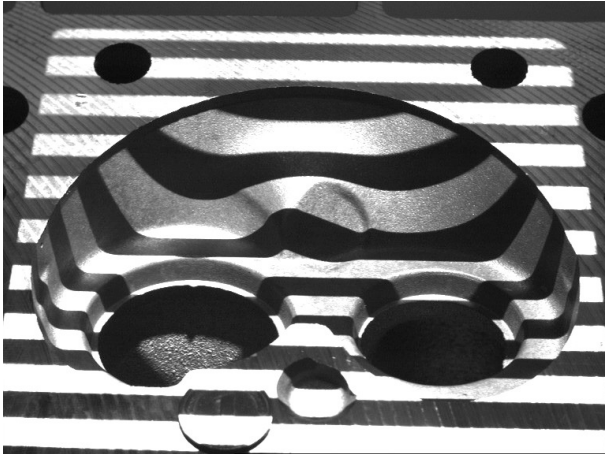
) Die Oberfläche muss zumindest etwas Licht zum Sensor streuen, darf also **kein idealer Spiegel sein und **nicht alles Licht verschlucken**. Außerdem dürfen die projizierten Strukturen **nicht zu stark verwischt** werden.

7.3.4 Strukturierte Beleuchtung (Flächenabtastung)

- Zuordnung zwischen beobachteten Bildpunkten und Punkten des Beleuchtungsmusters bei flächenhafter Triangulation nicht eindeutig
- **Lösungsansatz:** Codierung der Objektpunkte durch horizontale/vertikale Projektionsserien (z. B. mittels **Gray-Code**); Bildanzahl entspricht Bitanzahl bei der Quantisierung der Koordinatenwerte



Beispiel: Inspektion von Zylinderköpfen



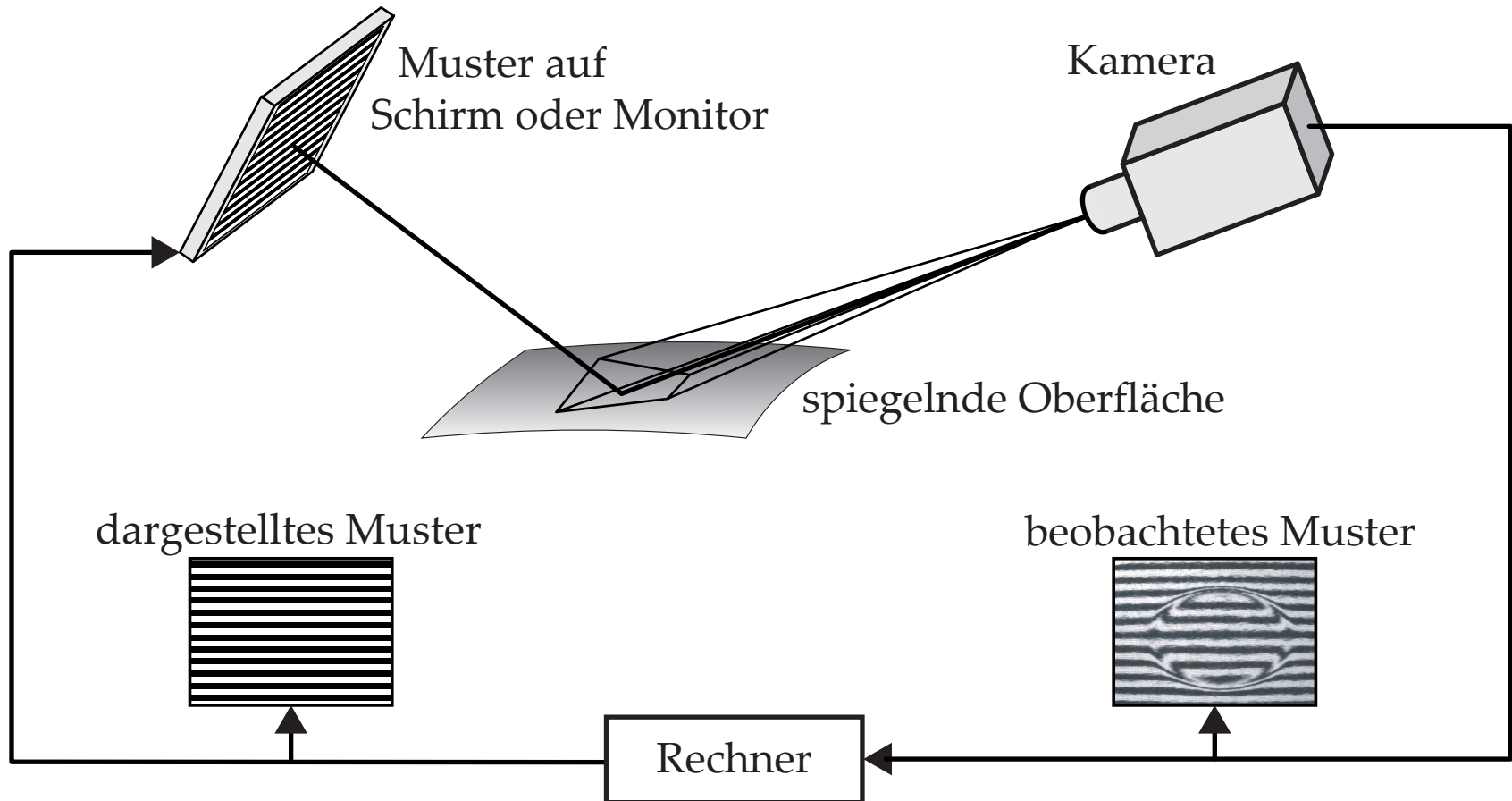
Horizontale Serie

Vertikale Serie

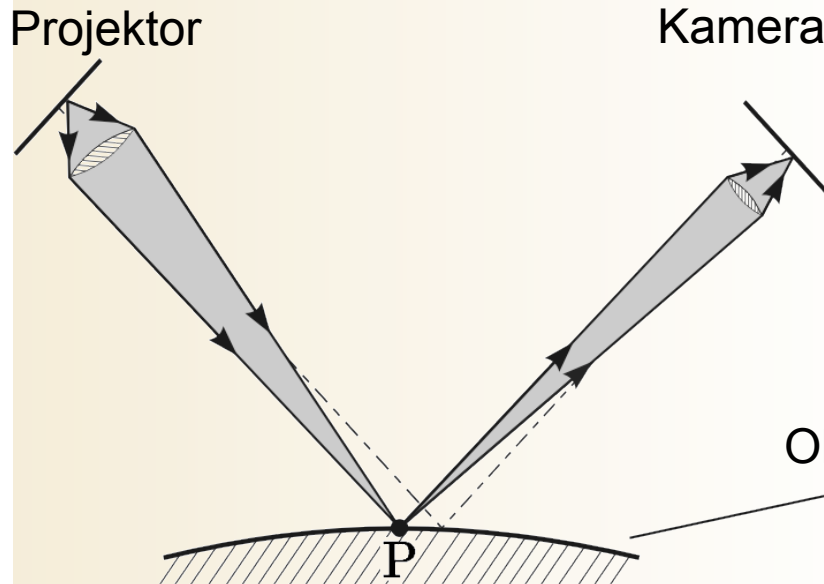
Rekonstruktion

7.3.5 Deflektometrie

- Bei spiegelnden Oberflächen kann ein verwandtes Verfahren angewendet werden: die **Deflektometrie** (auch: Rasterreflexion)
- Verfahren imitiert Inspektion spiegelnder Objekte durch Menschen

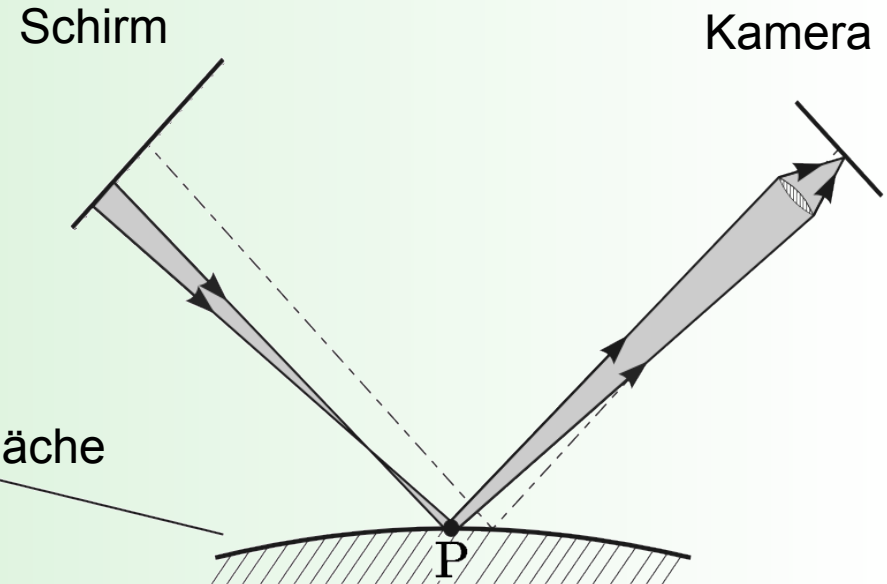


Triangulation



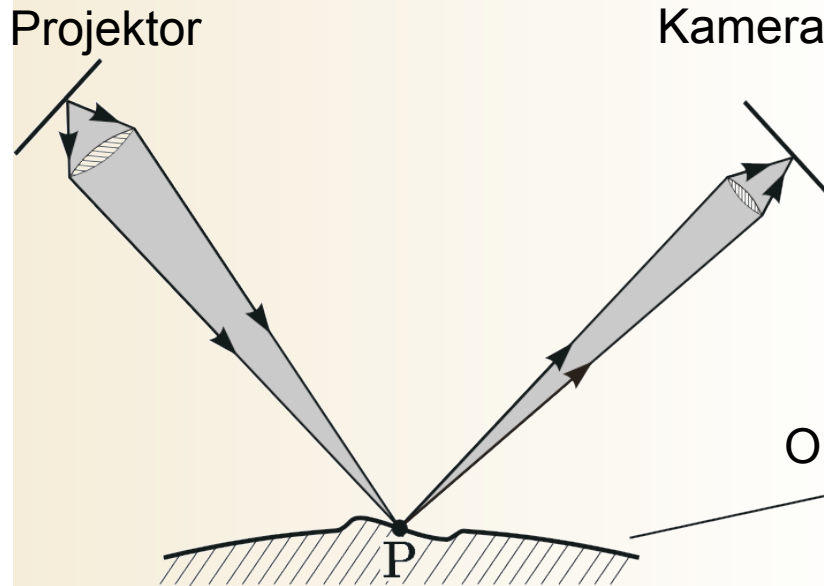
- Muster werden auf Oberfläche projiziert
- Kamera ist auf Oberfläche fokussiert

Deflektometrie



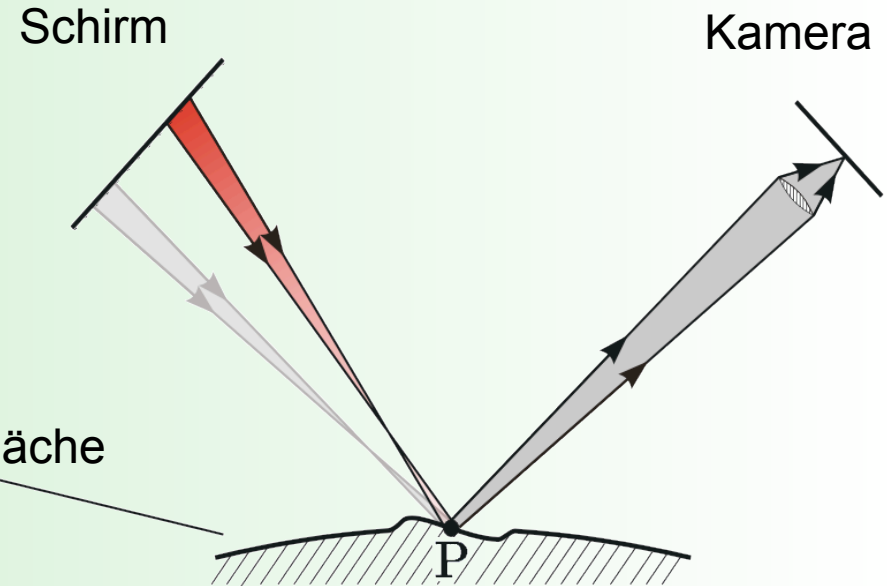
- Muster werden auf einem Schirm dargestellt
- Kamera beobachtet Spiegelbilder der Muster

Triangulation



- Nur gegen Änderungen der Topographie empfindlich

Deflektometrie



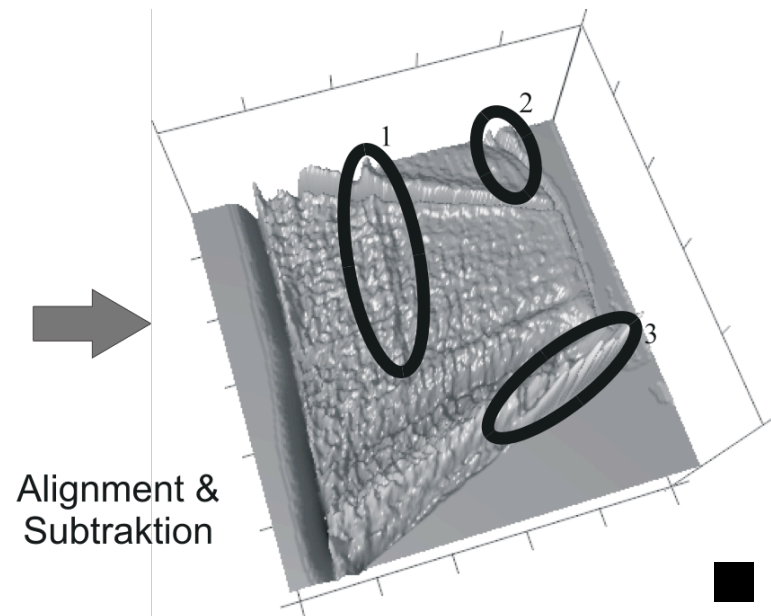
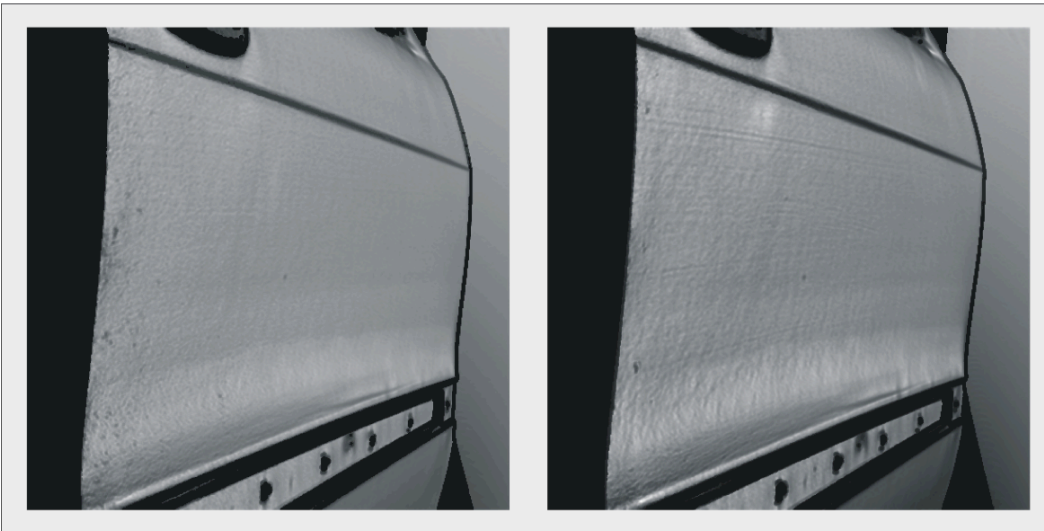
- Empfindlich gegen Neigungs- und Topographieänderungen
- Geometrie des Messaufbaus bestimmt Empfindlichkeit

Beispiel: Deflektometrische Inspektion spiegelnder Oberflächen

- Für eine Inspektion/Rekonstruktion der Oberflächengeometrie Zuordnung zwischen den Bildpunkten der Kamera und des Schirms erforderlich
 - Gray-codierte Muster erfordern scharfe Abbildung des Schirms (→ schlechte laterale Auflösung der Oberfläche)
 - **Phasenschiebeverfahren** (horizontal, vertikal) robust gegenüber Abbildungsunschärfe und erlauben scharfe Abbildung der Oberfläche
- Qualitätsbewertung durch Vergleich der Zuordnungsfunktion mit Referenz

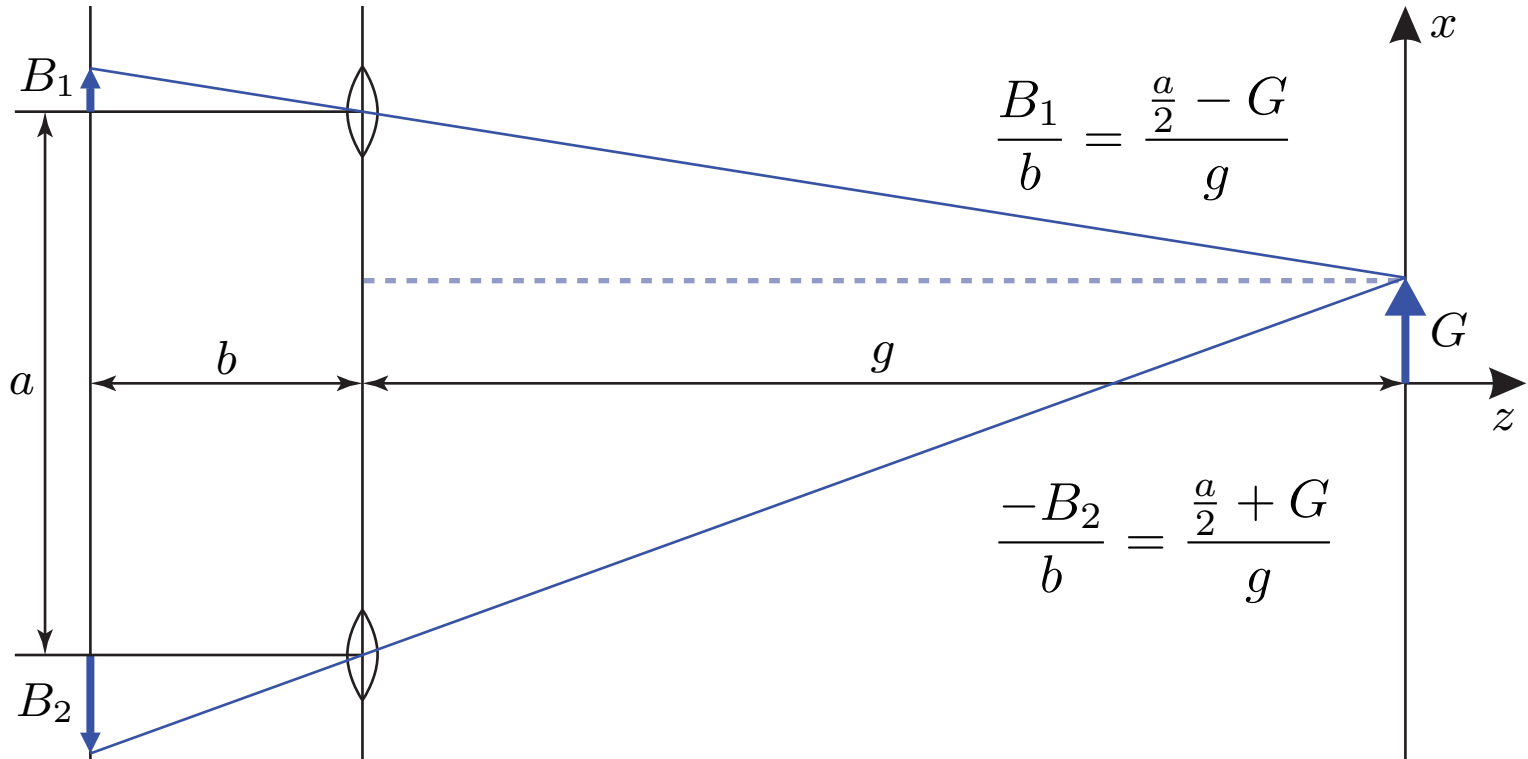
Referenzobjekt

Prüfobjekt



Prinzip

- Betrachtung eines Objektpunktes aus **2 verschiedenen Blickwinkeln**
- **Einfachster Sonderfall:** zwei Kameras mit komplanaren Sensoren
- Berechnung der Gegenstandsweite g (\rightarrow Relief) aus der **Parallaxe** $B_1 - B_2$



$$\frac{B_1}{b} = \frac{\frac{a}{2} - G}{g}$$

$$\frac{-B_2}{b} = \frac{\frac{a}{2} + G}{g}$$

a : stereoskopische Basis

■ Parallaxe:

$$p := B_1 - B_2$$

■ Strahlensatz:

$$(1) \quad \frac{B_1}{b} = \frac{\frac{a}{2} - G}{g}$$

$$(2) \quad \frac{-B_2}{b} = \frac{\frac{a}{2} + G}{g}$$

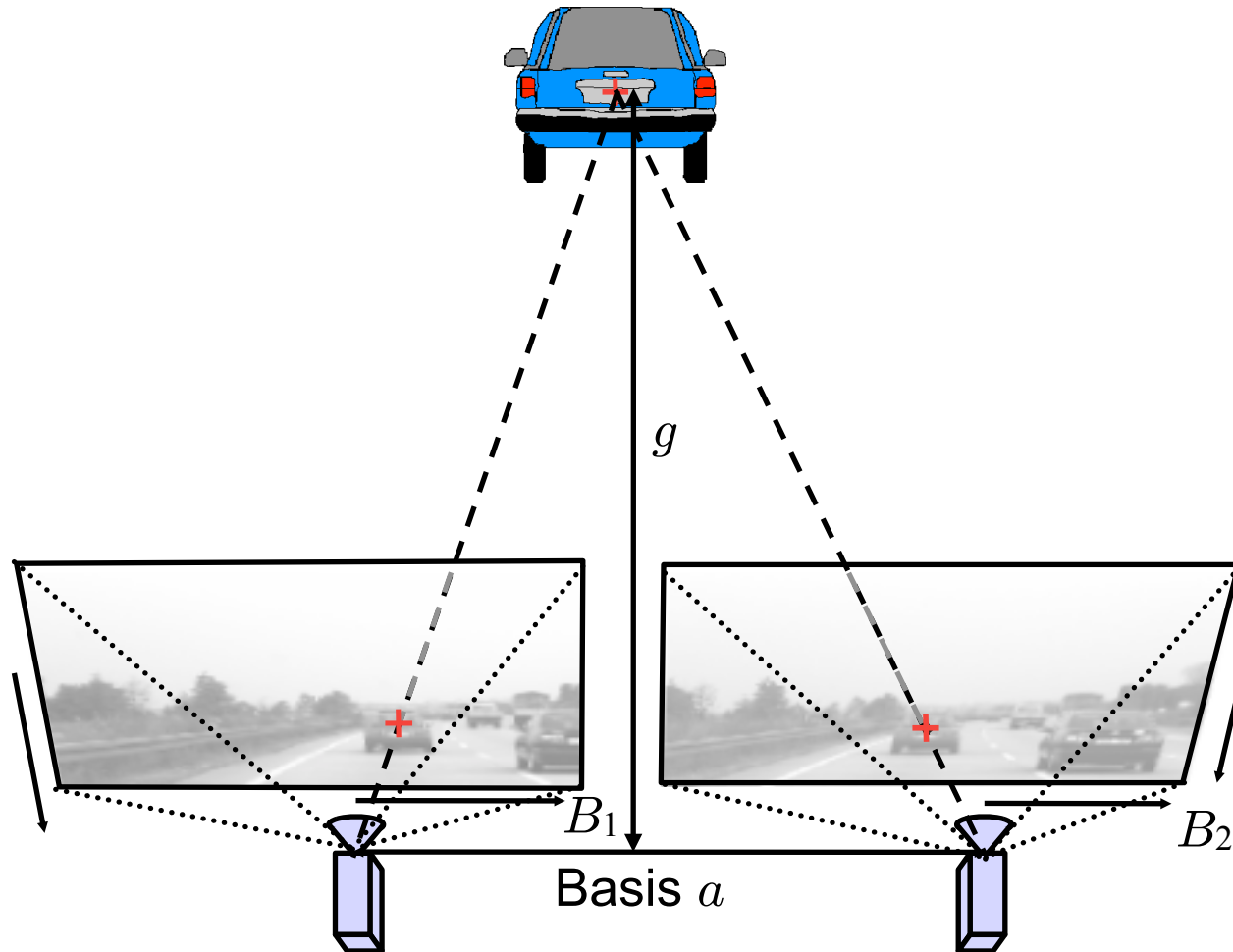
■ (1) + (2):

$$g = \frac{a b}{p}$$

■ **Voraussetzung:** Objekt muss in x -Richtung eine Struktur aufweisen

■ Führt man das Verfahren für alle in beiden Bildern eindeutig identifizierbaren Punkte durch → **Relief**

Stereo-Kameraanordnung zur Entfernungsmessung an Bord eines Pkw



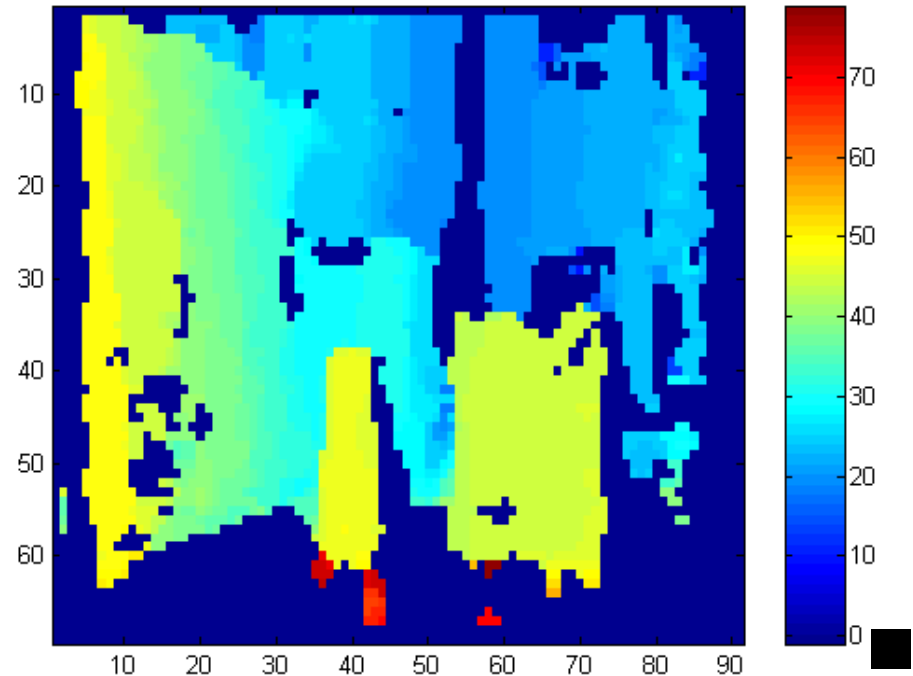
hohe laterale Auflösung, großer Öffnungswinkel, mittlere Reichweite

7.3.8 Stereoaufnahmen

Beispiel: Erkennung von Hindernissen an Bord eines mobilen Roboters



Gefilterte Disparität



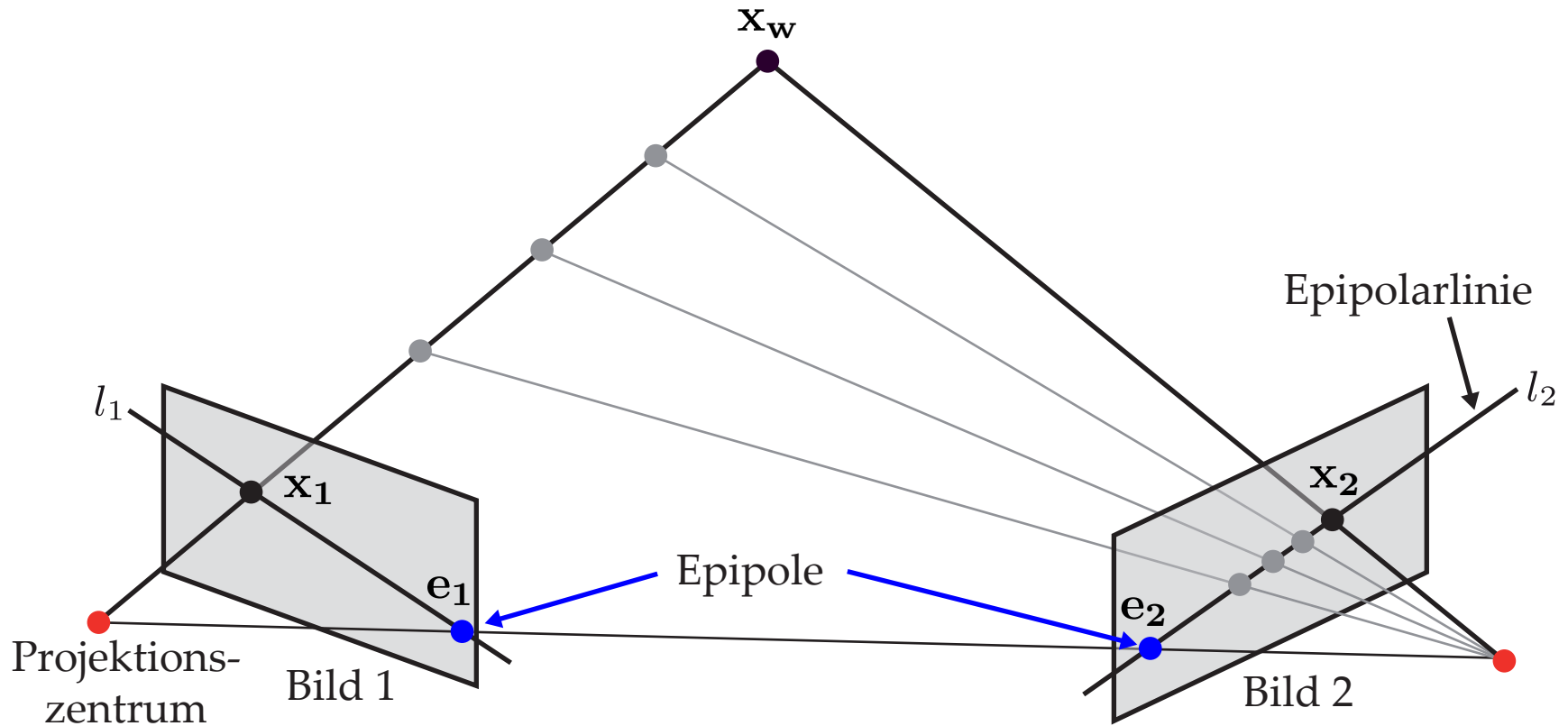
- Bei nicht komplanaren Kameras muss die relative Lage der Kameras zueinander über eine **Kalibrierung** bestimmt werden. Die Entfernungsmessung bei bekannten Bildkoordinaten führt auf ein lineares Gleichungssystem, in das die Kameraparameter eingehen [BPF12, Abschn. 3.3].

Korrespondenzproblem

- Lösung dieses Problems entscheidend bei der Stereobildauswertung.
- Aufgrund der Geometrie der Zentralprojektion liegen ein Objektpunkt x_w und seine beiden Bildpunkte x_1, x_2 in einer Ebene (sog. **Epipolarebene**):
 - ist durch den Bildpunkt in der ersten Kamera und die beiden optischen Projektionszentren eindeutig bestimmt;
 - schneidet Bildebene der 2. Kamera in einer Geraden (**Epipolarlinie**);
 - der korrespondierende Bildpunkt liegt auf dieser Epipolarlinie.
- Bei komplanaren Bildebenen sind die Epipolarlinien stets achsenparallel. Ansonsten lassen sie sich bei gegebenem Bildpunkt in einer Kamera durch eine einfache Matrixmultiplikation berechnen. Die benötigte Matrix kann durch Kalibrierung geschätzt werden [BPF12].

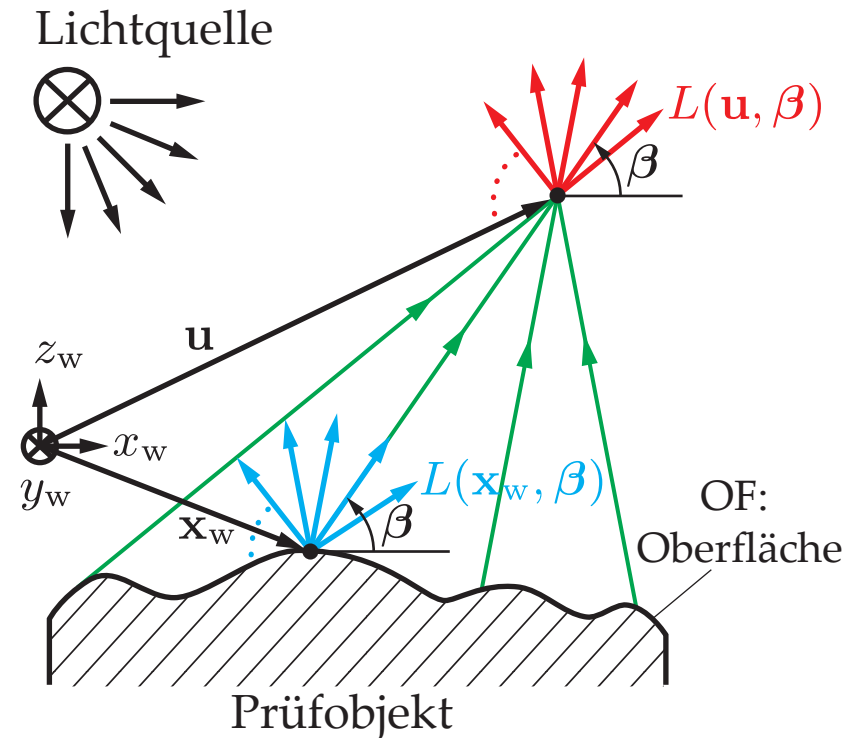
Epipolargeometrie

- Die möglichen Korrespondenzpunkte x_2 im rechten Bild liegen auf der Linie l_2 , die durch den Schnitt der Epipolarebene mit der Bildebene bestimmt ist.

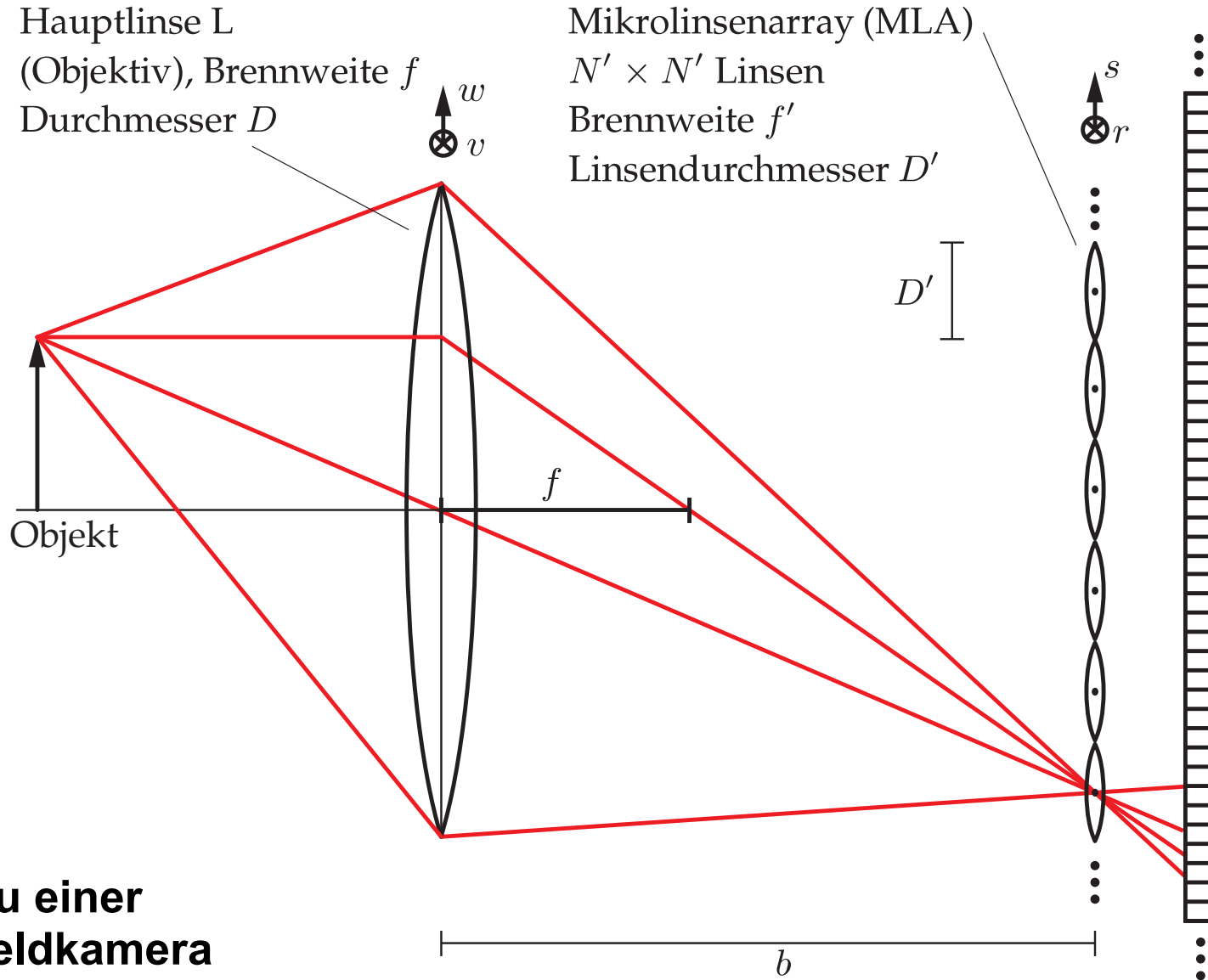


7.3.9 Lichtfeldkamera

- **Lichtfeld** $L(\mathbf{x}_w, \beta)$ beschreibt die Strahldichte aller Lichtstrahlen, die vom Punkt \mathbf{x}_w eines Objekts unter festen Beleuchtungsbedingungen in Richtung β ausgehen
- Ist $L(\mathbf{x}_w, \beta)$ für alle Punkte einer Objektoberfläche bekannt, so ist damit auch das vom Prüfobjekt induzierte Lichtfeld $L(\mathbf{u}, \beta)$ im umliegenden Raum eindeutig bestimmt
- Bei bekanntem Lichtfeld könnte man daraus für alle möglichen Kameraperspektiven und beliebige Kameraparameter die zugehörigen Bilder berechnen
- **Lichtfeldkamera** (plenoptische Kamera): spezielle Kamera, die einen Ausschnitt des Lichtfelds auf einer Ebene erfassen kann
- Trotz 5-Dimensionalität von L ist Lichtfeld 4-dimensional, da Strahldichte längs Geraden konstant ist

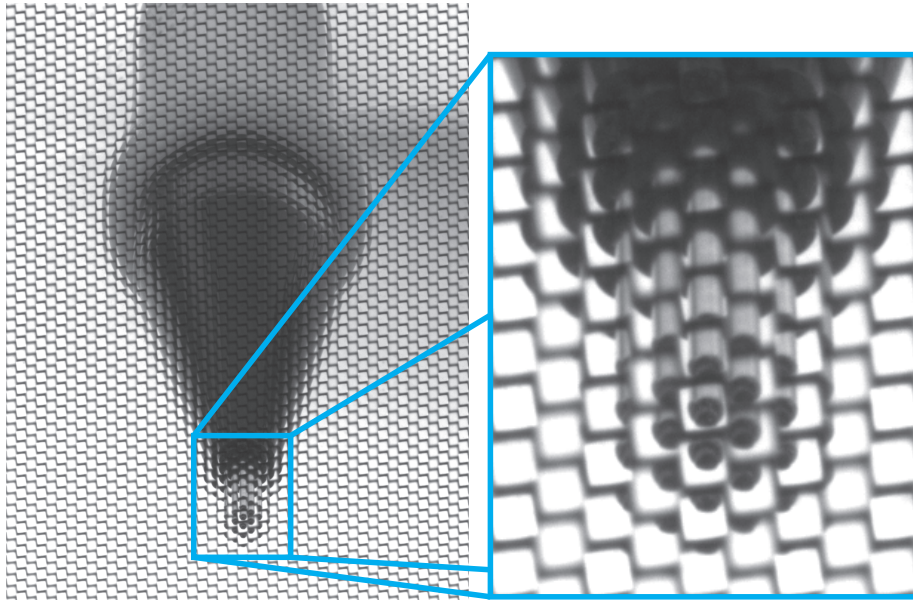


7.3.9 Lichtfeldkamera



Aufbau einer Lichtfeldkamera

Beispiel: Aufnahme eines Druckbleistifts mit einer Lichtfeldkamera

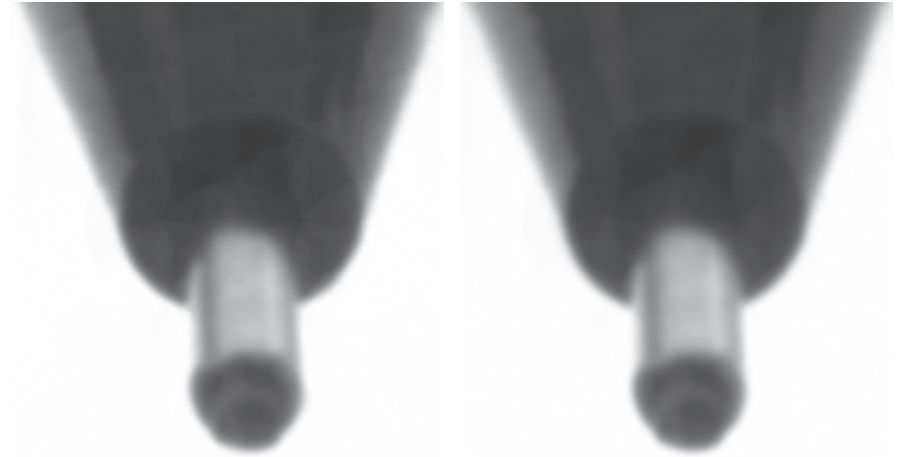


(a)

(b)

Rohdaten des
Bildsensors

Ausschnitt der
Bleistiftspitze



(c)

(d)

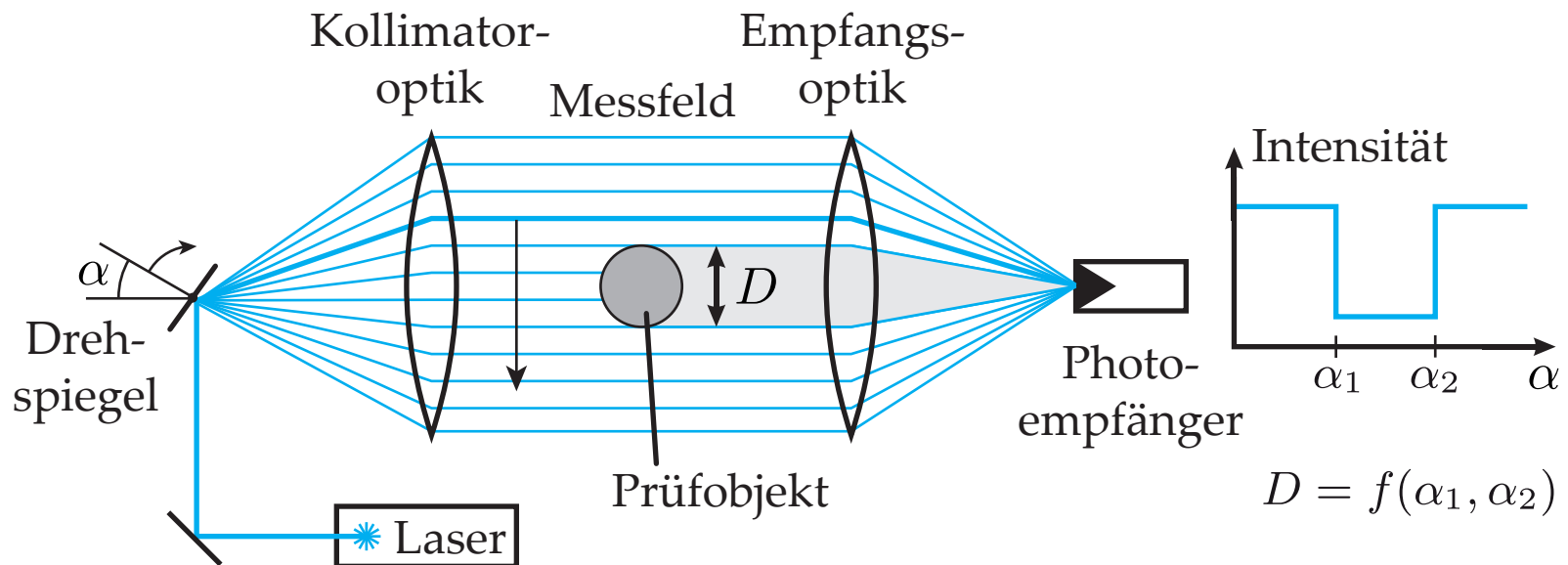
Aus den Rohdaten synthetisierte
Bilder mit horizontal
verschobener Perspektive

7.3.10 Silhouettenerfassung

- Hellfeld- und Dunkelfeldanordnungen können nicht nur zur Reflektanz-erfassung, sondern auch zur Prüfung der **Objektsilhouette** eingesetzt werden (2D-Projektion der 3D-Objektstruktur)

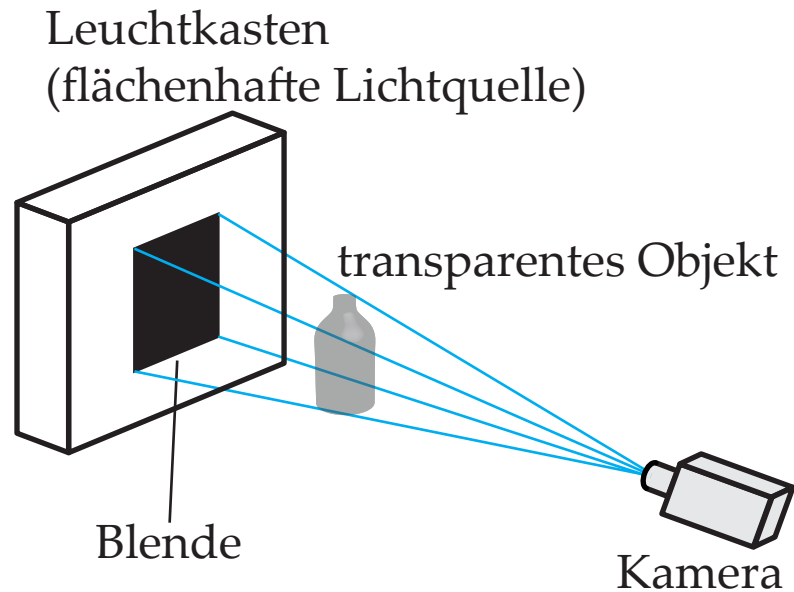
Beispiel: Telezentrischer Laserscanner zur Silhouettenvermessung

- Laserscanner im Hellfeldbetrieb nach dem Schattenwurfprinzip
- Messbereich wird durch Laserstrahl sequenziell abgetastet
- Aus dem „Nullsignal“ am Detektor wird der Objektdurchmesser berechnet



Beispiel: Erfassung der Silhouette transparenter Objekte

- Flächenhafte Beleuchtung wird mit einer Maske abgedunkelt, die geringfügig größer als das Sehfeld der Kamera ist
- Infolge des Streulichts erscheinen Kanten des transparenten Objekts hell



Prinzip der Silhouettenerfassung durch Dunkelfeldbeleuchtung



Dunkelfeld-
aufnahme



Hellfeld-
aufnahme zum
Vergleich

Fremdlichtunterdrückung

- Abdunkelung
- Modulation der Beleuchtung (z. B. durch rotierende Lochscheibe)
Demodulation auf Empfängerseite
- großer Störabstand durch hohen Nutzsignalpegel
 - Hellfeldbeleuchtung
 - Blitz + synchroner Shutter
- monochrome Beleuchtung + schmalbandige Filter auf Empfängerseite
- Referenzaufnahme des Störlichteinflusses und Berücksichtigung bei weiterer Verarbeitung (Störlichteinfluss muss zeitlich konstant sein!)

Inverse Beleuchtung

- Beleuchtung und Bildaufnahme werden an ein Referenzobjekt angepasst, sodass ein einfach auszuwertendes (z. B. homogenes) Bild $g_{\text{Ref}}(\mathbf{x})$ resultiert

