

"Shape from Polarisation" - eine neue 3D-Messmethode für die Endoskopie

Klaus SPINNLER¹, Julian KREIMEIER¹, Jürgen ERNST²

¹ Fraunhofer IIS, Entwicklungszentrum Röntgentechnik (EZRT), Fürth

² Fraunhofer IIS, Erlangen

Kontakt E-Mail: klaus.spinnler@iis.fraunhofer.de

Kurzfassung

Aus der Literatur sind Ansätze bekannt, um eine Erkennung der geometrischen Form von Objekten mit Hilfe der Polarisations-Information des vom Objekt reflektierten Lichtes zu durchzuführen: "Shape from Polarisation" (SfP). Dabei wird die physikalische Eigenschaft des Lichtes, bei Reflexion an einer Oberfläche seinen Polarisationszustand in bekannter Art und Weise zu ändern, genutzt. Zur Erfassung dieser Information ist ein Polarisations-sensitiver, bildgebender Sensor, eine sogenannte Polarisationskamera, erforderlich. Während in der Vergangenheit der Mangel an leistungsfähigen und kostengünstigen, derartigen Sensoren ein ernsthaftes Hindernis für die breitere Anwendung dieser Technologie war, werden in jüngster Zeit solche Sensoren und kostengünstige, industrietaugliche Polarisationskameras verfügbar, wie beispielsweise die Entwicklung des POLKA-Systems am Fraunhofer IIS.

Die Eigenschaften dieser Messmethode versprechen besondere Vorteile für die Anwendung in der technischen Endoskopie. Der Aufbau eines solchen 3D-Endoskop-Systems kann viel einfacher erfolgen als die bekannten, Triangulations-basierten Systeme wie Stereo-Endoskope oder Streifenprojektions-Endoskope mit strukturierter Beleuchtung. Es werden keine Messköpfe mit Spezial-Optiken benötigt. Spezielle Anforderungen an die Qualität der Beleuchtung sind nicht erforderlich. Das Verfahren ist insbesondere geeignet für glänzende oder hochglänzende Oberflächen.

Am Fraunhofer EZRT wurde das Verfahren für die Anwendung in Hohlräumen mittels technischer Endoskopie untersucht. Dazu wurden in einem Versuchsaufbau handelsübliche, Linsen-optische, starre Endoskope mit einer Polarisationskamera kombiniert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass solche Endoskope für das Verfahren geeignet sind. Es wurden Messungen an glänzenden metallischen Oberflächen, wie sie in hydraulischen Komponenten (z. B. im Automatikgetriebe) vorkommen, durchgeführt. In diesen Bohrungen konnte anhand erster Messungen die 3D-Darstellung von Bohrungswänden und räumlich ausgeprägten Defekten (z. B. Dellen, Schlagstellen) gezeigt werden. Es ist zu erwarten, dass damit die dreidimensionale Vermessung von Strukturen in Hohlräumen, wie z. B. Länge, Breite und Tiefe einer Delle oder eines Lunkers, möglich wird.

SHAPE FROM POLARISATION

Eine neue 3D-Messmethode für die Endoskopie



© Fraunhofer

Einführung

- Die 3D-Rekonstruktion oder -Vermessung in (kleinen) Hohlräumen ist eine immer wiederkehrende Aufgabenstellung.
- Vielzahl unterschiedlicher Verfahren für die optische 3D-Messtechnik.
- Zusätzliche Anforderungen (Miniaturisierung) für 3D-Messungen in Hohlräumen und Bohrungen durch beengte Platzverhältnisse.
- 3D-messende Endoskope am Markt verfügbar.
- Warum ein weiteres, neues Verfahren?
 - Eignung für hochglänzende Oberflächen
 - Monokulares Verfahren, keine Triangulationsbasis erforderlich
 - Schnelles Verfahren (»single shot«)
 - Eignung für »off-the-shelf« Endoskope
 - Kostengünstige, industrietaugliche Polarisations-Kameras verfügbar

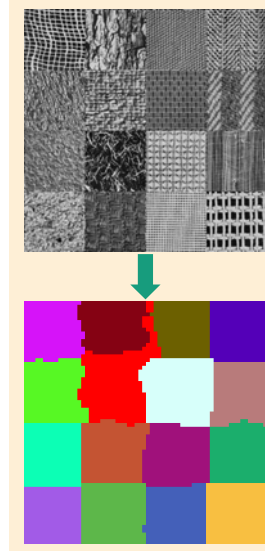
© Fraunhofer

2

Shape from Polarisation

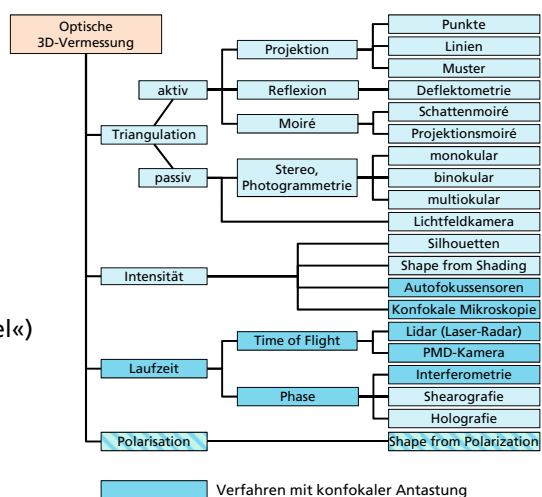
Inhalt

- Optische 3D-Messverfahren
- Polarisations-Bildgebung
- Polarisations-Kamera
- Das Verfahren »Shape from Polarisation«
- »Shape from Polarisation« und Endoskopie
- Versuche und Ergebnisse



Optische 3D-Messverfahren

- Hohe Anzahl verschiedener Verfahren
- Systematiken / Familien
- Physikalische Messgröße
 - Triangulation (»Winkel«)
 - Intensität
 - Laufzeit
 - Polarisation

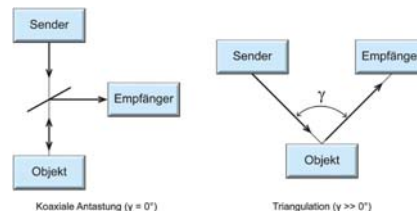


Optische 3D-Messverfahren

■ Systematiken / Familien

■ Räumliche Anordnung

- Koaxiale Antastung ($\gamma \equiv 0^\circ$)
- Triangulation ($\gamma \neq 0^\circ$)



■ Anregung

- »Passiv«: keine speziellen Anforderungen an die Beleuchtung (»Umgebungslicht«)
- »Aktiv«: spezielle Anforderungen an die Beleuchtung (z. B. Laser, strukturierte Beleuchtung, etc.)

Quelle: Fraunhofer IOF

Optische 3D-Messverfahren

■ Abhängigkeit von Oberflächeneigenschaften, z. B.

- Deflektometrie: nur hoch glänzende, spiegelnde Oberflächen
- Musterprojektion, Stereo: nur matte Oberflächen

■ Zugänglichkeit

- Triangulierende Verfahren: Einschränkungen durch Abschattungen
- Koaxiale Verfahren: Keine Einschränkung

■ Heute in der Endoskopie

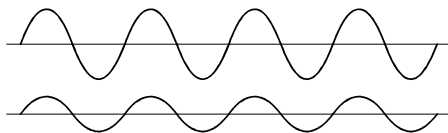
- Überwiegend »Triangulation«
- unterschiedliche KO-Kriterien für »Intensität«, »Laufzeit«

■ Weiterführende Literatur

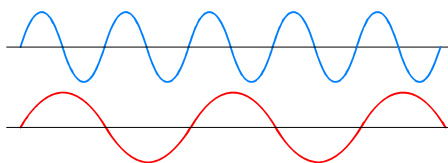
- Sackewitz, Michael (Hrsg.): Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2014
- Beyerer, Jürgen; Puente Leon, Fernando; Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung. Berlin: Springer Vieweg, 2012

Polarisations-Bildgebung

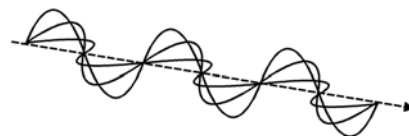
- **Intensität (Amplitude):**
Wahrnehmung als Helligkeit



- **Wellenlänge:**
Wahrnehmung als Farbe



- **Polarisation (Schwingungsrichtung):**
keine Wahrnehmung



© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Bildgebung

- Alle natürlichen und künstlichen Lichtquellen sind unpolarisiert



- Ausnahme: Laser

© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Bildgebung

- **Streuung an kleinen Teilchen**

Beispiel: blauer Himmel

- **Reflexion an Oberflächen**

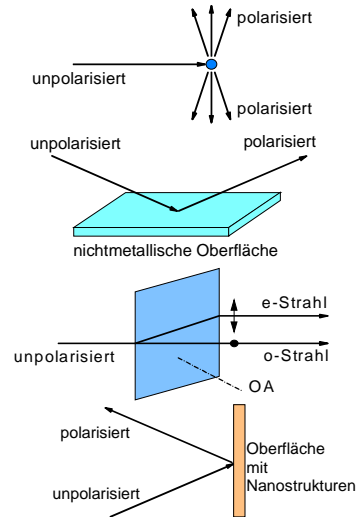
Beispiele: Wasser, Glas, Haut, Pflanzenblätter, Kunststoff

- **Doppelbrechung**

Beispiele: Kalkspat, Quarz, Nervenfasern

- **Polarisierende Nanostrukturen**

(künstliche und natürliche)



© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Bildgebung

- **unpolarisiert:**

alle Schwingungsrichtungen gleich stark

Polarisationsgrad = 0%

- **vollständig polarisiert:**

nur eine Schwingungsrichtung

Polarisationsgrad = 100%

- **teilweise polarisiert:**

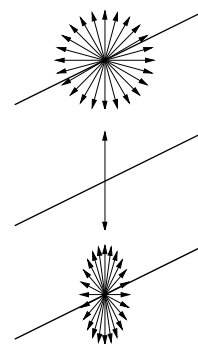
alle Schwingungsrichtungen, unterschiedlich stark

Polarisationsgrad = 50% (Beispiel)

- (Zirkulare Polarisation: hier vernachlässigt)

- Beschreibung eines Polarisationsbildes:

- Intensität (I)
- Polarisationsgrad (DOLP)
- Polarisationswinkel (AOMP)

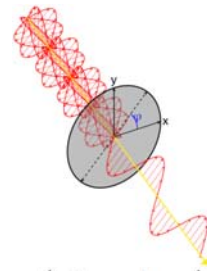


© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Bildgebung

- Erzeugung von polarisiertem Licht durch Polarisationsfilter
- Erfassung von Polarisationsbildern durch Intensitätsmessung bei unterschiedlicher Winkelstellung des Polarisationsfilters (I_{0° , I_{45° , I_{90° , I_{135°)
- Beschreibung der Polarisation mit Stokes-Parametern bzw. Stokes-Vektoren
- Berechnung der Komponenten:
 - Intensität (I)
 - Polarisationsgrad (DOLP)
 - Polarisationswinkel (AOMP)



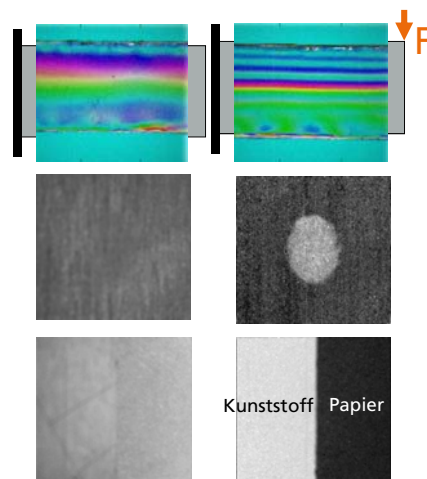
$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_{RZ^\circ} - I_{LZ^\circ} \end{pmatrix}$$

$$I = S_0 \quad DOLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$$

$$AOMP = \frac{1}{2} \text{Arg}(S_1 + iS_2)$$

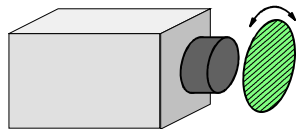
Polarisations-Bildgebung

- Spannungsmessung in transparenten Materialien, z. B. Acrylglas (Falschfarbendarstellung)
- Ölfleck auf gebürsteter Metalloberfläche (rechts: Polarisationsgrad DOLP)
- Papier auf weißem Kunststoff (rechts: Polarisationsgrad DOLP)

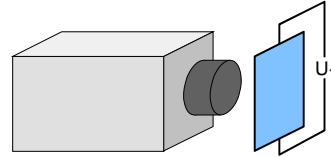


Polarisations-Kamera

- Mechanische Polfilter, die gedreht werden -> sequentielle Aufnahme



- Großflächiger LCD-Shutter, der elektrisch umgeschaltet wird, -> sequentielle Aufnahme



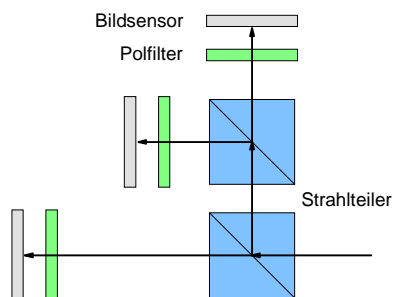
- Mindestens 4 Aufnahmen erforderlich
- Nur für statische Szenen geeignet

© Fraunhofer

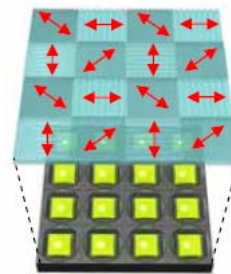
Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Kamera

- Strahlteiler, Aufteilung des Lichts auf mehrere Bildsensoren mit fixierten Polfiltern -> aufwändig; spezielle Objektive nötig



- Aufgeklebte strukturierte Polarisationsfilter auf dem Sensor -> aufwändige Justage

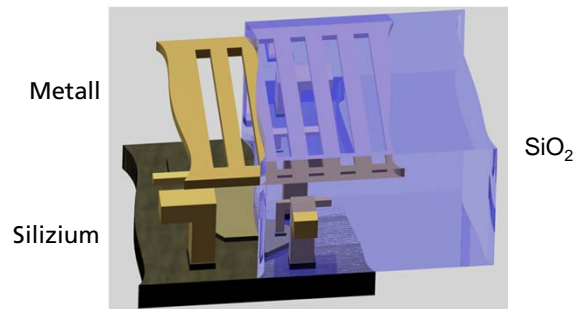


© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Kamera POLKA

- Drahtgitterpolarisator entsteht durch Nanostrukturierung der Al-Schicht mittels moderner CMOS-Technologie
- Aufbau eines Polarisationsensors mit Polarisator und Photodiode
- **Preiswerte Herstellung durch Standard-CMOS-Prozess**

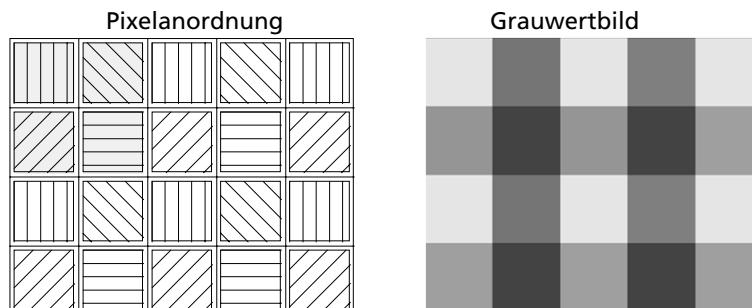


© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

Polarisations-Kamera POLKA

- 4 unterschiedlich orientierte Pixel in einer Gruppe (0, 45, 90, 135 Grad)



© Fraunhofer

Fraunhofer
EZRT

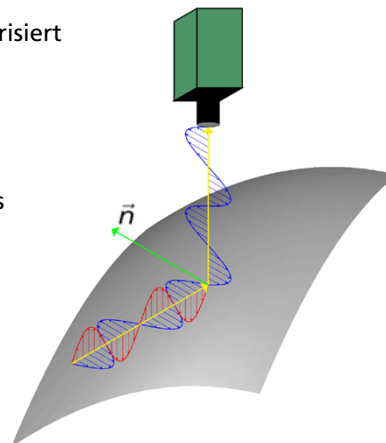
Polarisations-Kamera POLKA

- CMOS-Bildsensor mit integrierten Polarisationsfiltern (0° , 45° , 90° , 135°)
- Pixelweise Erfassung und Analyse von linear polarisiertem Licht
- Auflösung: 640x480 Pixel
- Single-shot Aufnahme
- Geschwindigkeit 20 fps
- GigE Vision Schnittstelle
- C-Mount
- Vergleichsweise kostengünstig



Shape from Polarisation

- Einfallendes - unpolarisiertes - Licht wird bei Reflexion partiell linear polarisiert
- Die partielle lineare Polarisation ist abhängig von Einfallswinkel und Brechungsindex
- Messung des Polarisations-Zustandes des reflektierten Lichtes in Form eines Polarisationsbildes

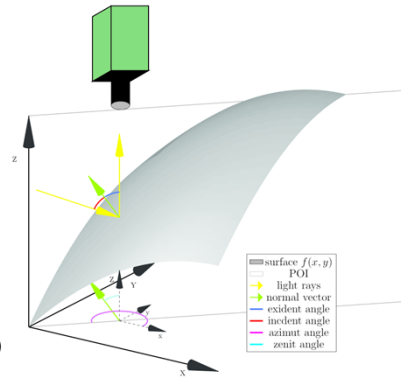


Shape from Polarisation

- Mit gemessenen Polarisationsdaten bei bekanntem Brechungsindex Oberflächen-Normale \vec{n} von Flächenelement für jedes Pixel bestimmen

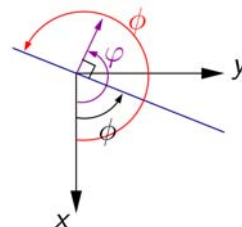
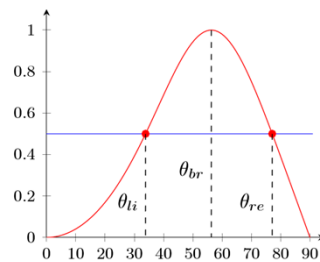
$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan \theta \cos \phi \\ \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Aus dem Normalenvektorfeld gesamte Oberfläche rekonstruieren (z. B. Frankot-Chellappa-Algorithmus)



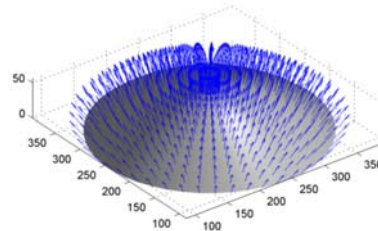
Shape from Polarisation

- Bestimmung des Normalen-Vektors \vec{n} durch Bestimmung von Azimut- und Zenit-Winkel
- Bestimmung des Zenit-Winkels aus dem Polarisationsgrad DOLP
- Bestimmung des Azimut-Winkels aus dem Polarisationswinkel AOMP
- Mehrdeutigkeiten: jeweils zwei Lösungen für Azimut- und Zenit-Winkel



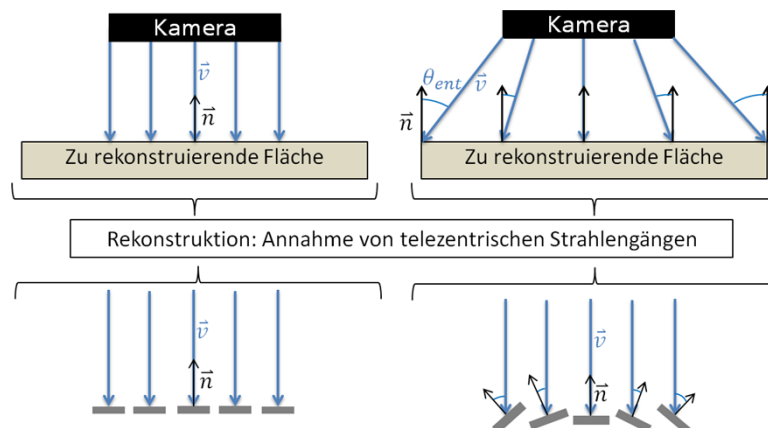
Shape from Polarisation

- Besonderheiten bei der Anwendung in der Endoskopie
 - Bedingung:
 - Telezentrischer Strahlengang
 - Für Endoskope i.d.R. nicht gegeben!
- In Bohrungen:
 - Bewegung des Endoskops durch die Bohrung
 - Bildsequenzen von Polarisationsbildern



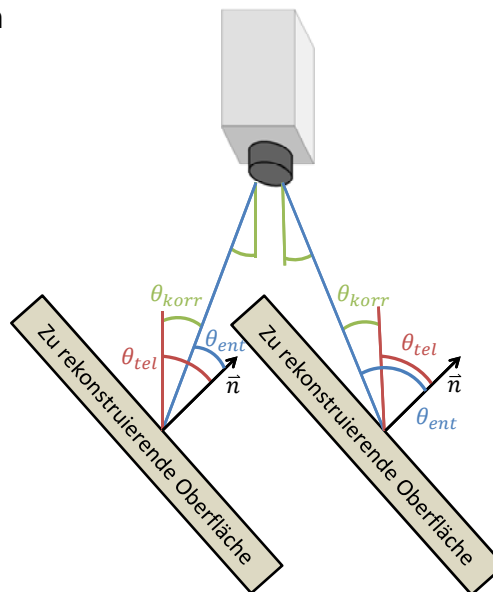
Shape from Polarisation

- Systematischer Fehler des Algorithmus bei Rekonstruktion divergenter, entozentrischer Strahlengänge (Weitwinkel-Objektiv, rechts):



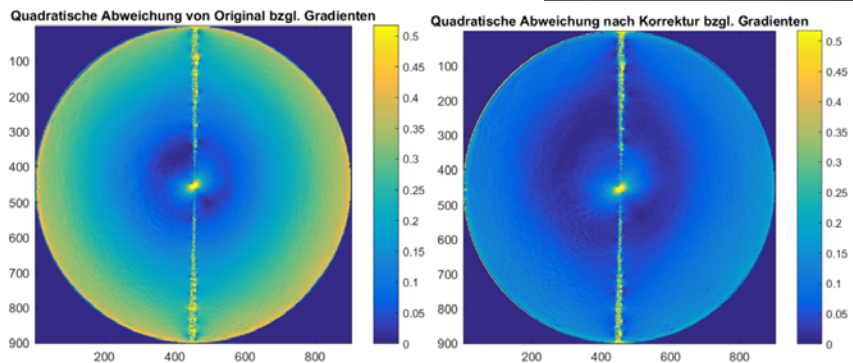
Shape from Polarisation

- Ansatz zur Korrektur:
- Systematischer Fehler ist abhängig vom Winkel des Sehstrahls
- Korrekturwinkel θ_{korr} entspricht Winkel von Sehstrahl bzgl. optischer Achse
- Jeden Zenitwinkel θ entsprechend dem dortigen Sehstrahl korrigieren
- $\theta_{tel} = \theta_{ent} \pm \theta_{korr}$



Shape from Polarisation

- Ergebnisse des Korrekturverfahrens, Beispiel: Kegeloberfläche

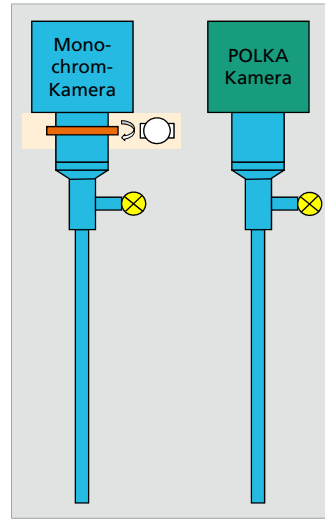


Shape from Polarisation

- »Polarisations-Video-Endoskop«

Prinzipieller Aufbau

- Polarisationskamera
 - Monochrom-Kamera mit drehendem Polarisationsfilter
 - POLKA (»single shot« Betrieb)
- Optischer Endoskop Adapter
- Starres Panorama Endoskop
- Beleuchtung



Shape from Polarisation

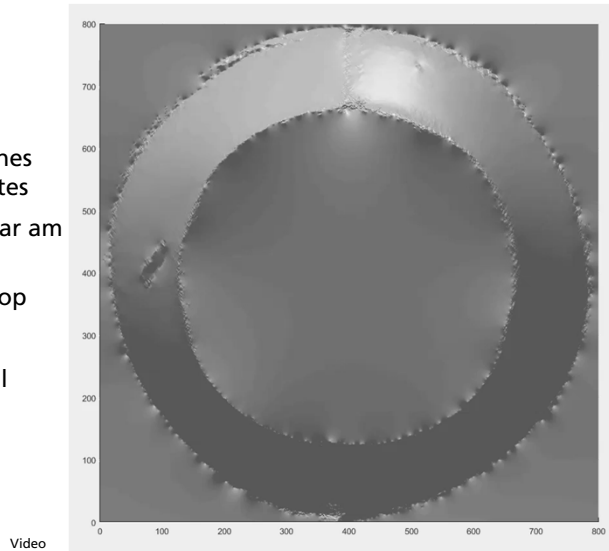


Phantom: Zweiteiliger Probekörper, innen schwarz glänzend lackiert, mit künstlicher Schlagstelle

Shape from Polarisation

Ergebnisse:

- Rekonstruktion eines Bohrungsabschnittes
- Schlagstelle sichtbar am linken Bildrand
- Panorama-Endoskop
 - 0° Blickwinkel,
 - 100° Bildwinkel



Shape from Polarisation

Reales Testobjekt:
Hydraulisches Bauteil mit Bohrungen
(Steuerblock)

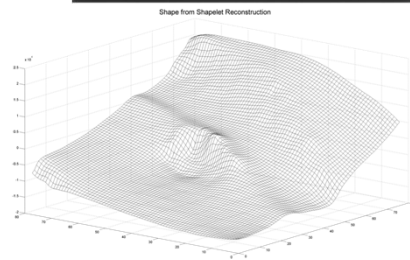
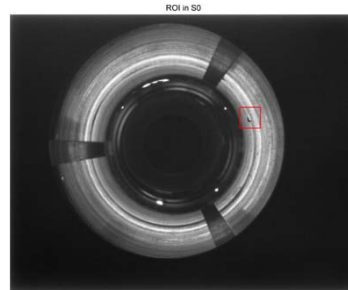
- Defekt: Schlagstelle (ca. 1mm)
- Aufnahme mit Panorama-Endoskop und zusätzlicher Beleuchtung
- Auswertung der markierten ROI



Shape from Polarisation

Ergebnisse:

- 3D-Rekonstruktion auf kleiner ROI
- Die Rekonstruktion der lokalen Geometrie ist möglich
- Die umlaufende Kante der Stufenbohrung sowie die Form der Schlagstelle sind gut sichtbar.



Shape from Polarisation

Fazit

- Die 3D-Rekonstruktion von inneren Oberflächen mit der »Shape from Polarisation« Methode ist möglich unter Verwendung marktüblicher, starrer Endoskope
- Die Methode ist insbesondere für (hoch-) glänzende Oberflächen geeignet, bei denen »Triangulation« (Stereo, Musterprojektion) problematisch ist.
- Monokulare Methode, die prinzipiell auch mit kleinsten Endoskopen für sehr kleine Zugänge funktioniert
- Neuerdings verfügbare Polarisationskameras erlauben
 - sehr kurze Messzeiten (»single shot«)
 - robuste, industrietaugliche und kostengünstige Realisierung

Endoskopie und digitale Bildverarbeitung

Herzlichen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit !

Fragen ?



Klaus Spinnler (klaus.spinnler@iis.fraunhofer.de)
Julian Kreimeier (kreimejn@iis.fraunhofer.de)
Jürgen Ernst (juergen.ernst@iis.fraunhofer.de)