Polarisationsbildgebung und -analyse

Bernd Jähne

Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI) am
Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR)
Universität Heidelberg Bernd.Jaehne@iwr.uni-heidelberg.de

69. Heidelberger Bildverarbeitungsforum
Fraunhofer ISOB, Karlsruhe, 3. Juli 2018

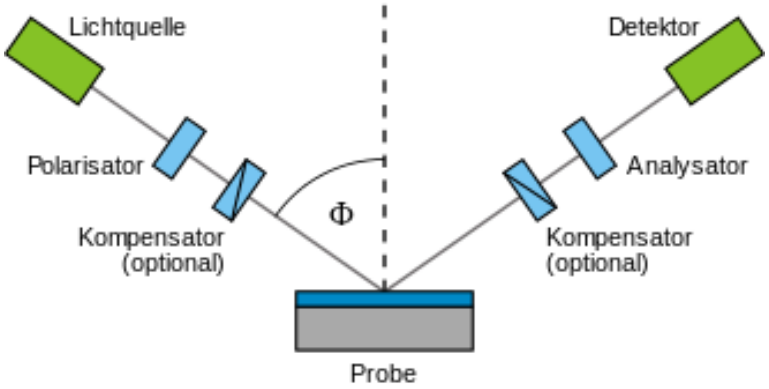
1288 EMVA Standard Compliant

Gliederung

1. Einführung: Nutzen von polarisiertem Licht
   Von Nischentechnik zu allgemeiner Verwendung
2. Beschreibung von polarisiertem Licht
3. Anwendungsbeispiele
4. Polarisationbildgebung wird einfach!
   Neue Polarisationsbildsensoren
5. Ausblick

1288 EMVA Standard Compliant

Nischenanwendung I: Ellipsometrie

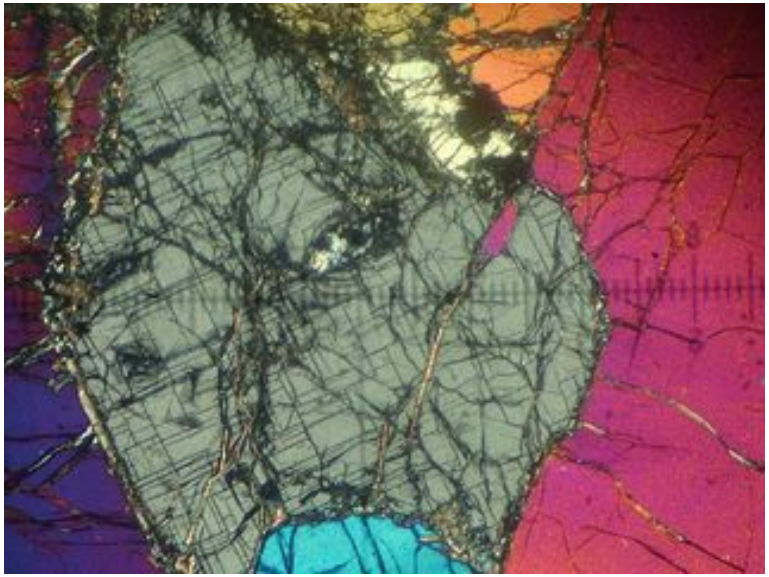


Quelle: `https://de.wikipedia.org/wiki/Ellipsometrie`

Materialidenifikation und Analyse dünner Schichten durch *Reflexion* polarisierten Lichtes

Oft nur punktförmig und nicht bildgebend

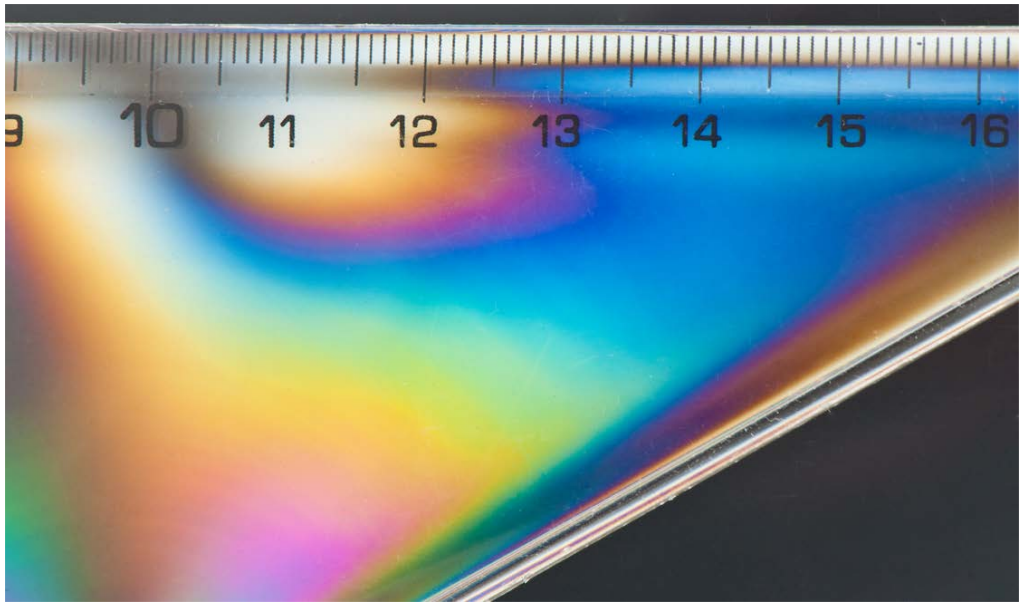
Nischenanwendung II: Kristallanalyse in der Mineralogie



Quellen: https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelbrechung und https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Polarisationsmikroskop

Anisotrope Materialien zeigen komplexe optische Eigenschaften: Doppelbrechung, wellenlängenabhängige Drehung der Polarisationsebene

Nischenanwendung III: Analyse innerer Materialspannungen



Quelle: B. Jähne: Digitale Bildverarbeitung, 7. Aufl. Springer 2012

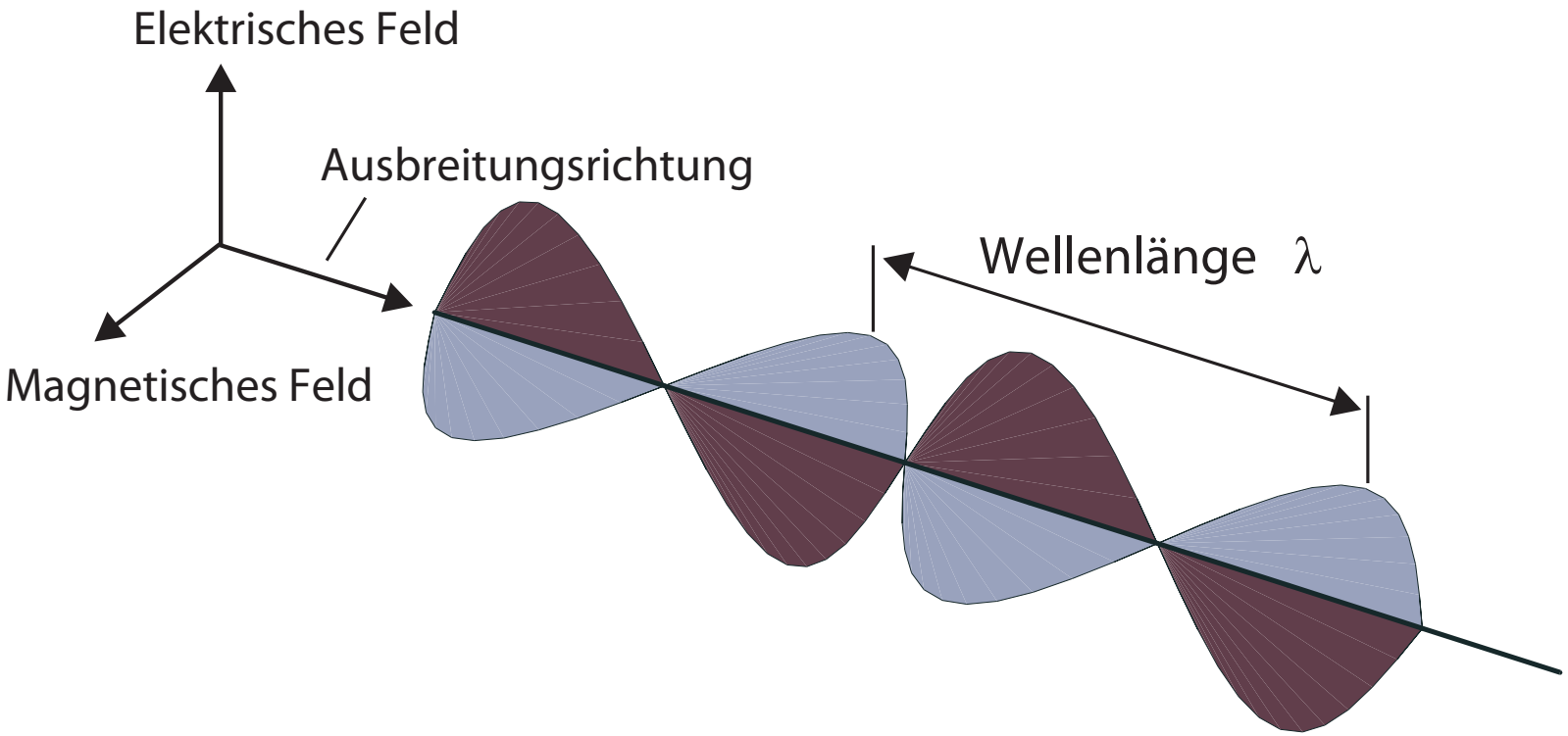
Spannungszustände erzeugen *Anisotropie* in Materialien

Zu zeigen: Polarisiertes Licht vielseitiges nutzbares Instrument für visuelle Inspektion und Computer Vision

Beschreibung polarisiertes Lichts

1288 EMVA Standard Compliant

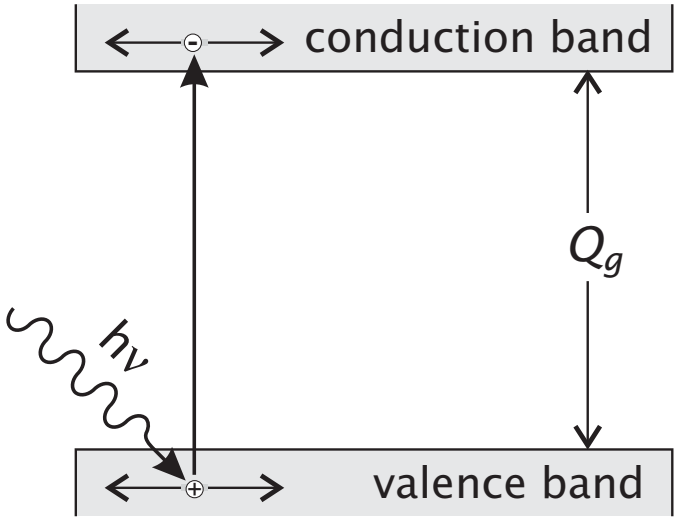
Licht: transversale elektromagnetische Welle



Elektrisches und magnetisches Feldes schwingen senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsgeschwindigkeit

Richtungscharakterisierung nennt man *Polarisation*

Licht: Photon (und Bildaufnahme)



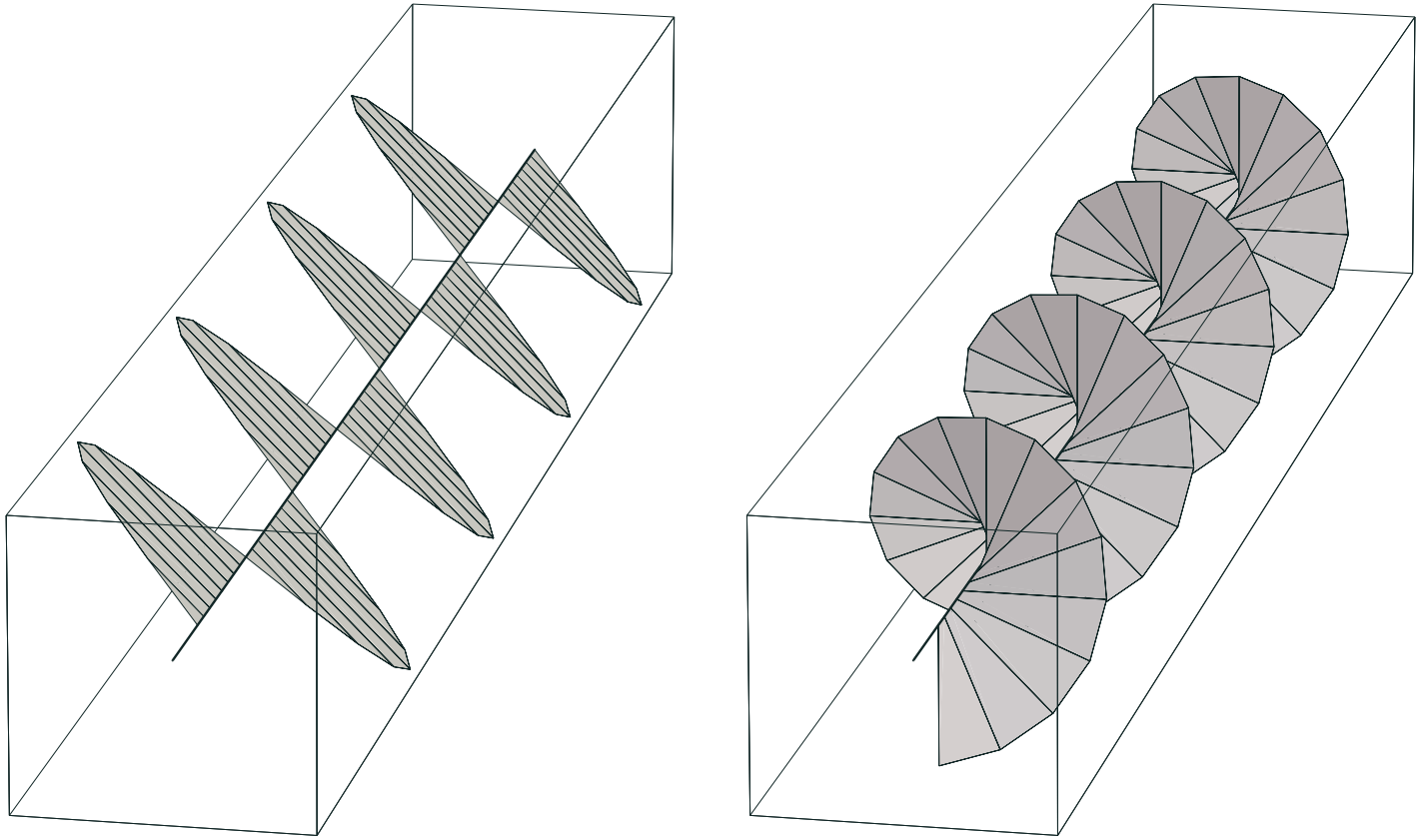
intrinsic (pure)

- Bildgewinnung durch Konversion von Photonen in Ladungsträger durch inneren Photoeffekt
- Kenntnis über Wellenlänge (Farbe), Phasenlage und Polarisationszustandes des Lichts geht verloren
- Jede Art multimodaler Bildaufnahme (Farbe, spektral, Polarisation) benötigt zusätzliche optische Elemente

Beschreibung Polarisationszustand I

- **Intensität** (= Amplitudenquadrat der Feldstärke), wie bisher
- **Richtung:** Schwingungsebene des elektrischen Feldes
  Winkel zwischen 0 und 180°
- **Polarisationsgrad:** Anteil polarisierten Lichtes

Linear und zirkular polarisiertes Licht



keine 90 Grad

Phasenverschiebung
zwischen horizontaler und vertikaler Komponente

1288 EMVA Standard Compliant

Beschreibung Polarisationszustand II

- **Intensität** (= Amplitudenquadrat der Feldstärke), wie bisher
- **Richtung:** Schwingungsebene des elektrischen Feldes
  Winkel zwischen 0 und 180°
- **Polarisationsgrad I:** Anteil linear polarisierten Lichtes
- **Polarisationsgrad II:** Anteil zirkular polarisierten Lichtes

Stokes Vektor

Volle Beschreibung inkohärenten Lichts *ohne* absolute Phasenlage

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_r - I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Gesamtintensität} \\ \text{linear pol. I} \\ \text{linear pol. II} \\ \text{zirkular pol.} \end{bmatrix}$$

Teilbeschreibung I

Keinerlei Information über Polarisationszustand

$$S_0$$

Teilbeschreibung II

Zirkulare und nicht polarisierte Anteil ununterscheidbar

$$\boldsymbol{S}_I = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix}$$

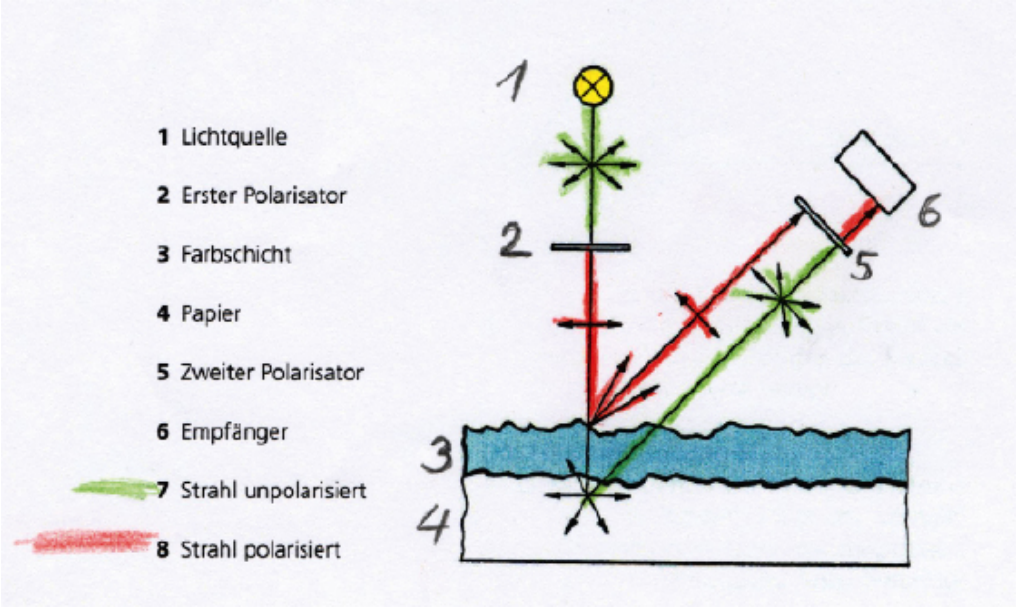
1288 EMVA Standard Compliant

Anwendungen

Reflexionsunterdrückung,
Oberflächennormale und
Brewster Angle Microscopy (BAM)

1288
EMVA Standard Compliant

Reflexionsunterdrückung

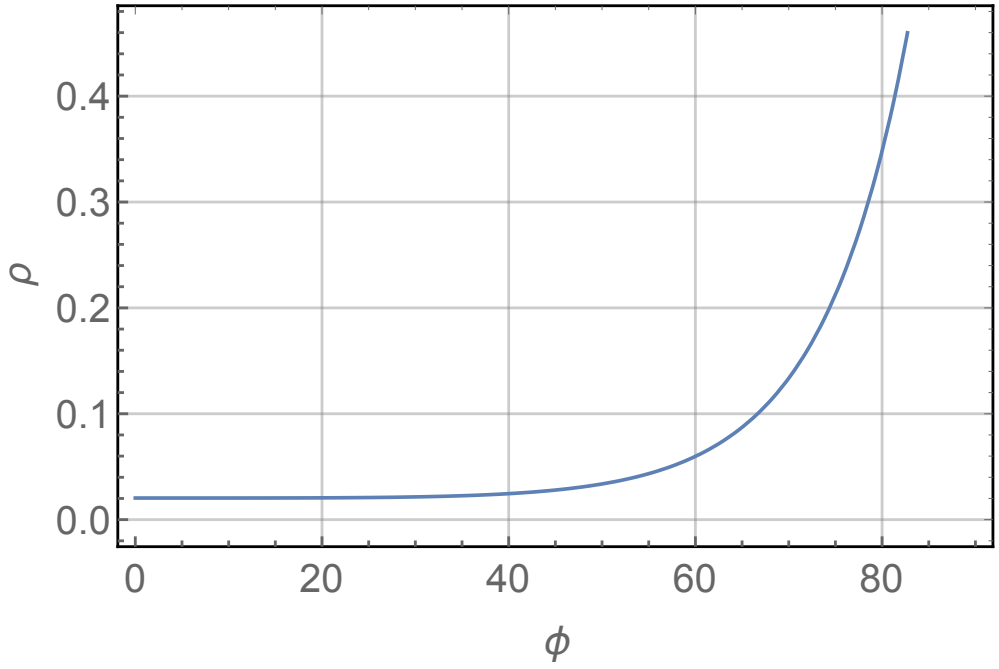


- Einfach und effektiv: Bestrahlung mit Licht, polarisiert in Ebene aufgespannt von Lichtquelle und Kamera
- Benötigt lediglich zwei Polarisationsfilter, keine spezielle Polarisationskamera

1288 EMVA Standard Compliant

Bestimmung von Oberflächennormalen

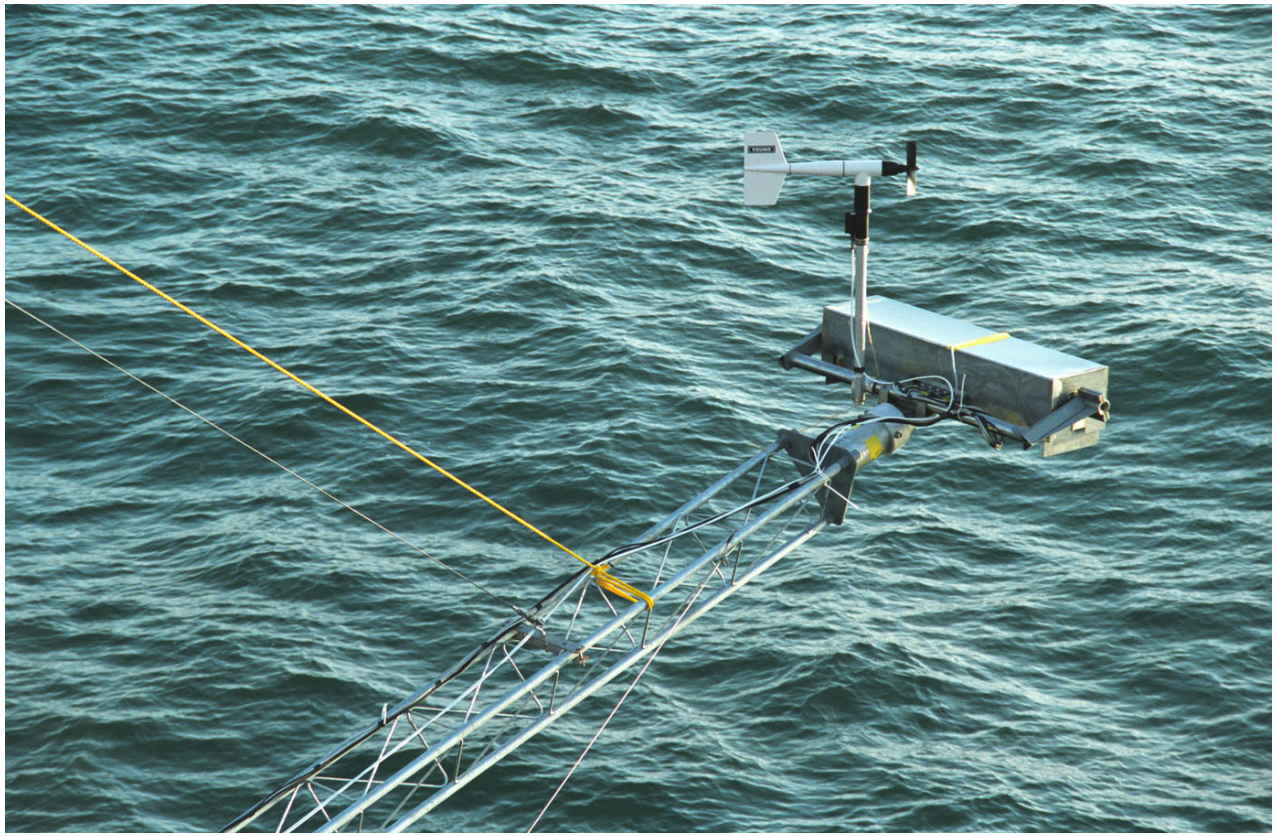
Reflexion an dielektrischen Oberflächen (Beispiel Wasser)



- Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten von Reflexionswinkel
- Komponente der Oberflächennormale in Blickrichtung kann bestimmt werden
- Stark nichtlineare Beziehung; Winkel bis fast 45 Grad kaum bestimmbar

1288 EMVA Standard Compliant

Anwendungsbeispiel aus Ozeanograhie



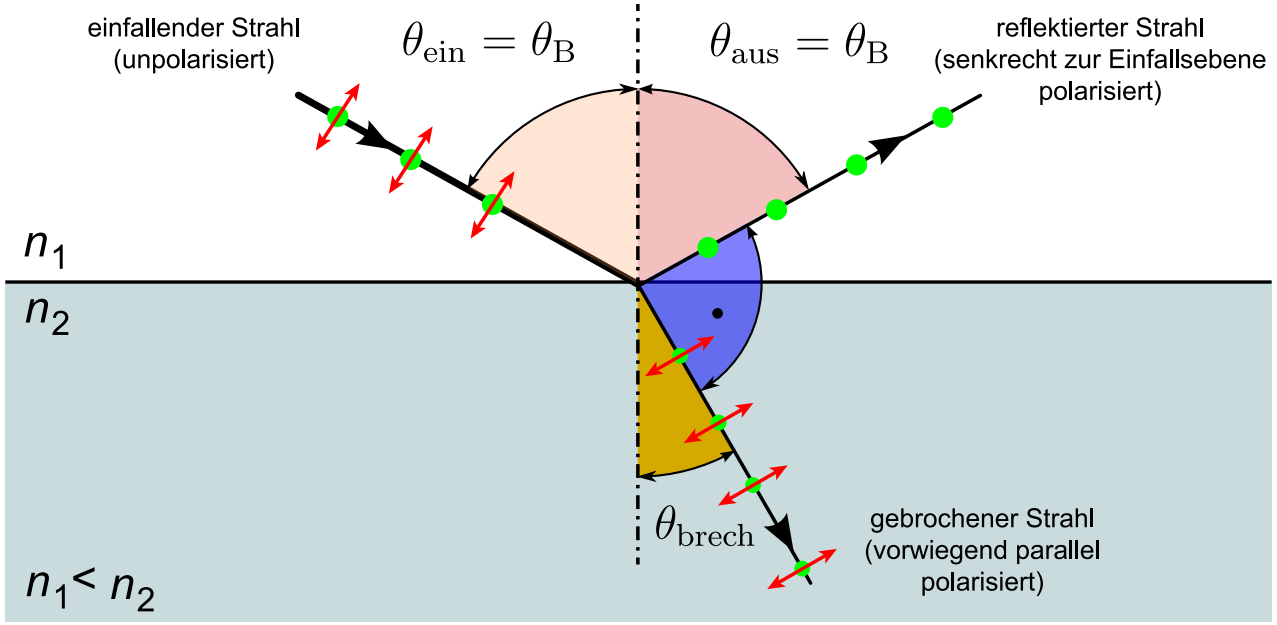
(Scripps Pier, La Jolla, Kalifornien, 1990)

Wellenneigungsmessung durch Helligkeitsmodulation (Stilwell Photographie, Stilwell, 1969); Vergleichbar mit "Shape from Shading" bei rauen Oberflächen

1288 EMVA Standard Compliant

Polarimetrische Bestimmung von Oberflächennormalen

Reflexion an dielektrischen Oberflächen



(Quelle: Wikipedia)

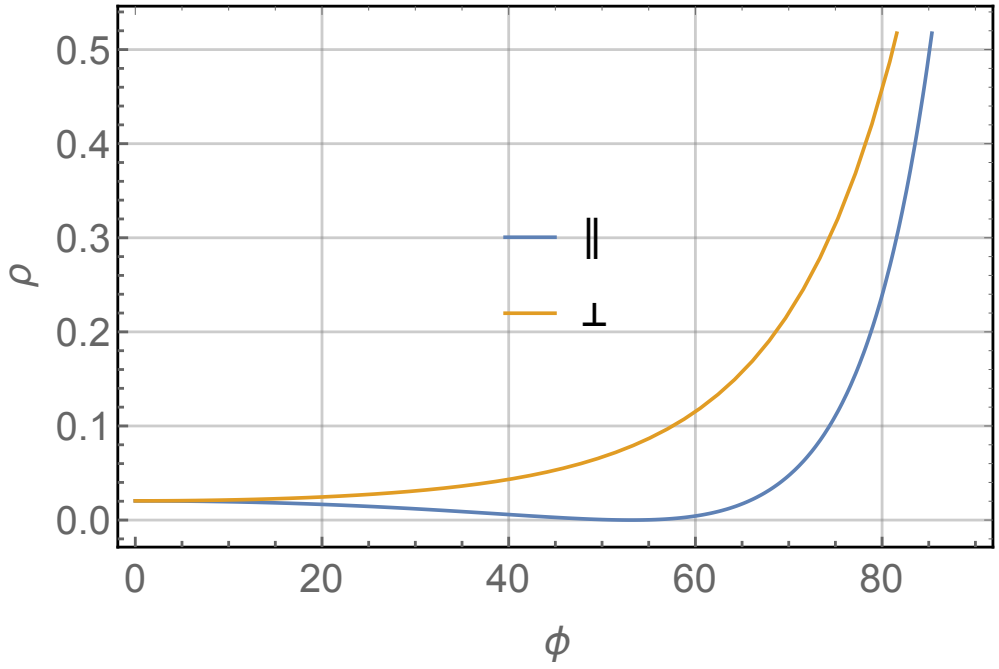
Wenn reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht aufeinander stehen, keine Reflexion von parallel (in der Strahlenebene) polarisiertem Licht

$\rightsquigarrow$ **Brewster Winkel** $\tan\theta_b = n_2/n_1$

1288 EMVA Standard Compliant

Polarimetrische Bestimmung von Oberflächennormalen

Reflexion an dielektrischen Oberflächen



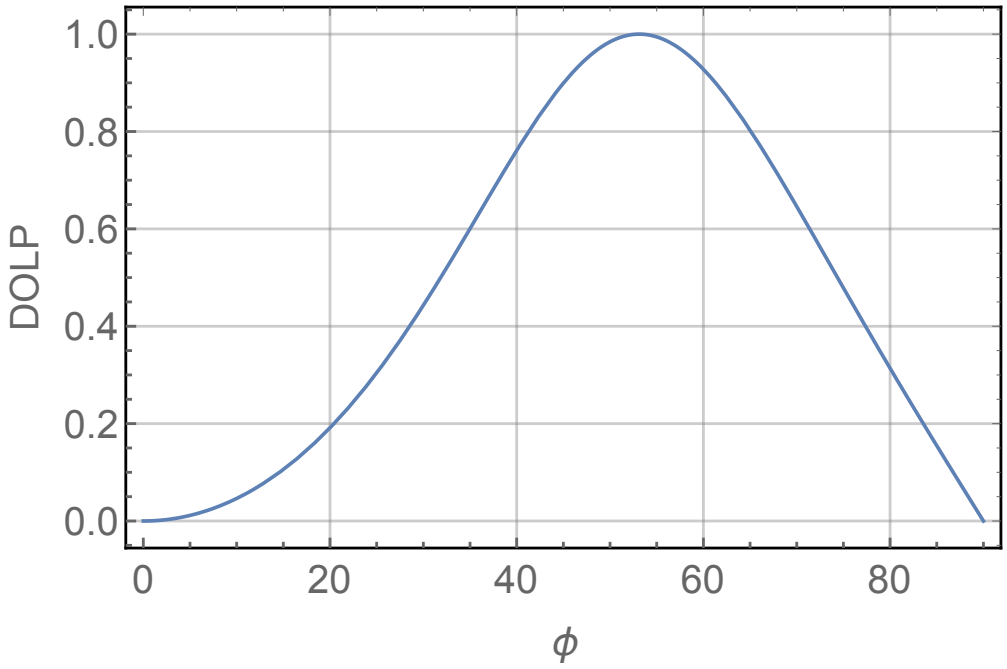
Nicht polarisierte Strahlung wird partiell polarisiert

Polarisationsgrad (degree of linear polarization, DOLP) P

$$P = \frac{\rho_\perp}{\rho_\perp + \rho_\parallel}$$

Polarimetrische Bestimmung von Oberflächennormalen

Reflexion an dielektrischen Oberflächen



DOPL wesentlich linearer über zwei Winkelbereiche (15–45 Grad und 60–90 Grad)

1288 EMVA Standard Compliant

Polarimetrische Bestimmung von Oberflächennormalen

Vollständige Bestimmung der Oberflächennormalen bei unpolarisierter Beleuchtung. Winkel

1. in Blickrichtung aus linearem **Polarisationsgrad** P
2. senkrecht zur Blickrichtung aus **Polarisationsrichtung** θ

Berechnung aus ersten drei Komponenten des Stokes Vektors:

$$\boldsymbol{S}_I = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix}$$

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \qquad \tan\theta = \frac{S_2}{S_1}$$

Benötigt wird Polarisationkamera mit vier Richtungen: 0, 45, 90 und 135 Grad (drei Richtungen reichen auch, Bauer, 2013)

1288 EMVA Standard Compliant

Beispiel: 3-D Rekonstruktion von Wasserwellen

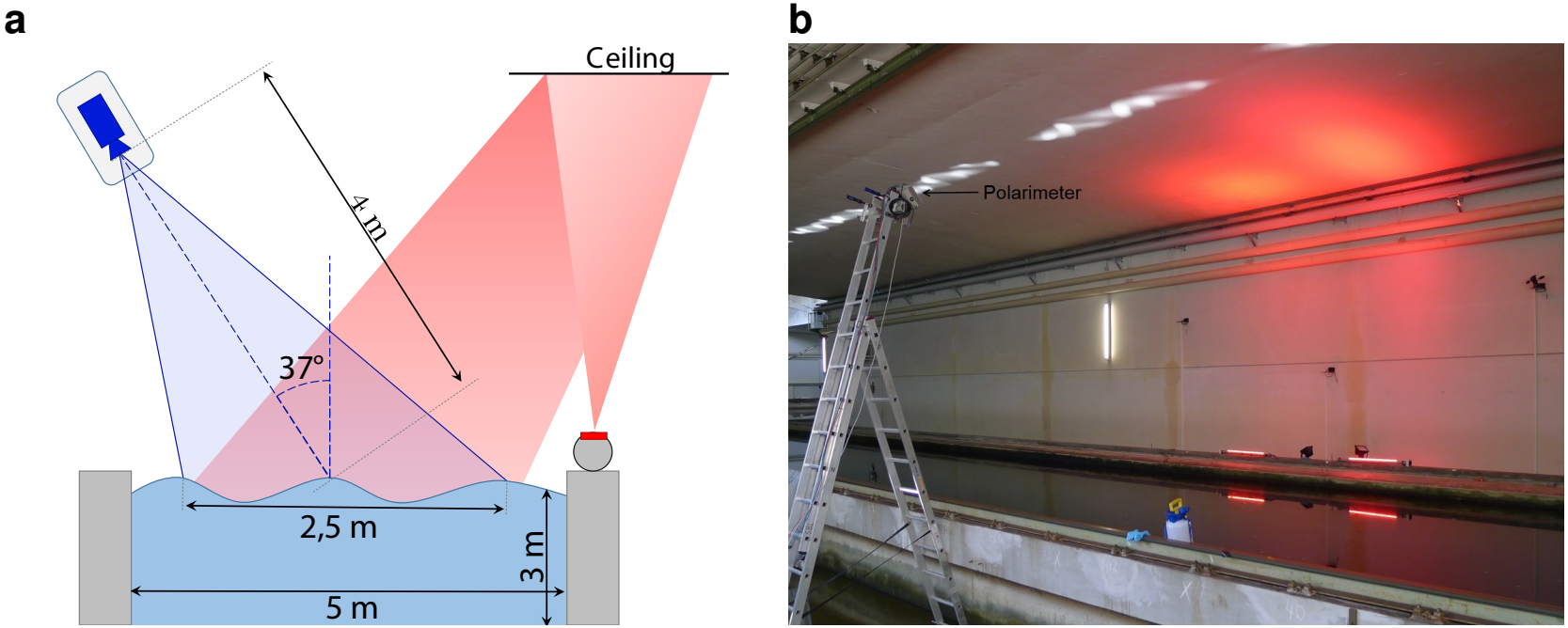
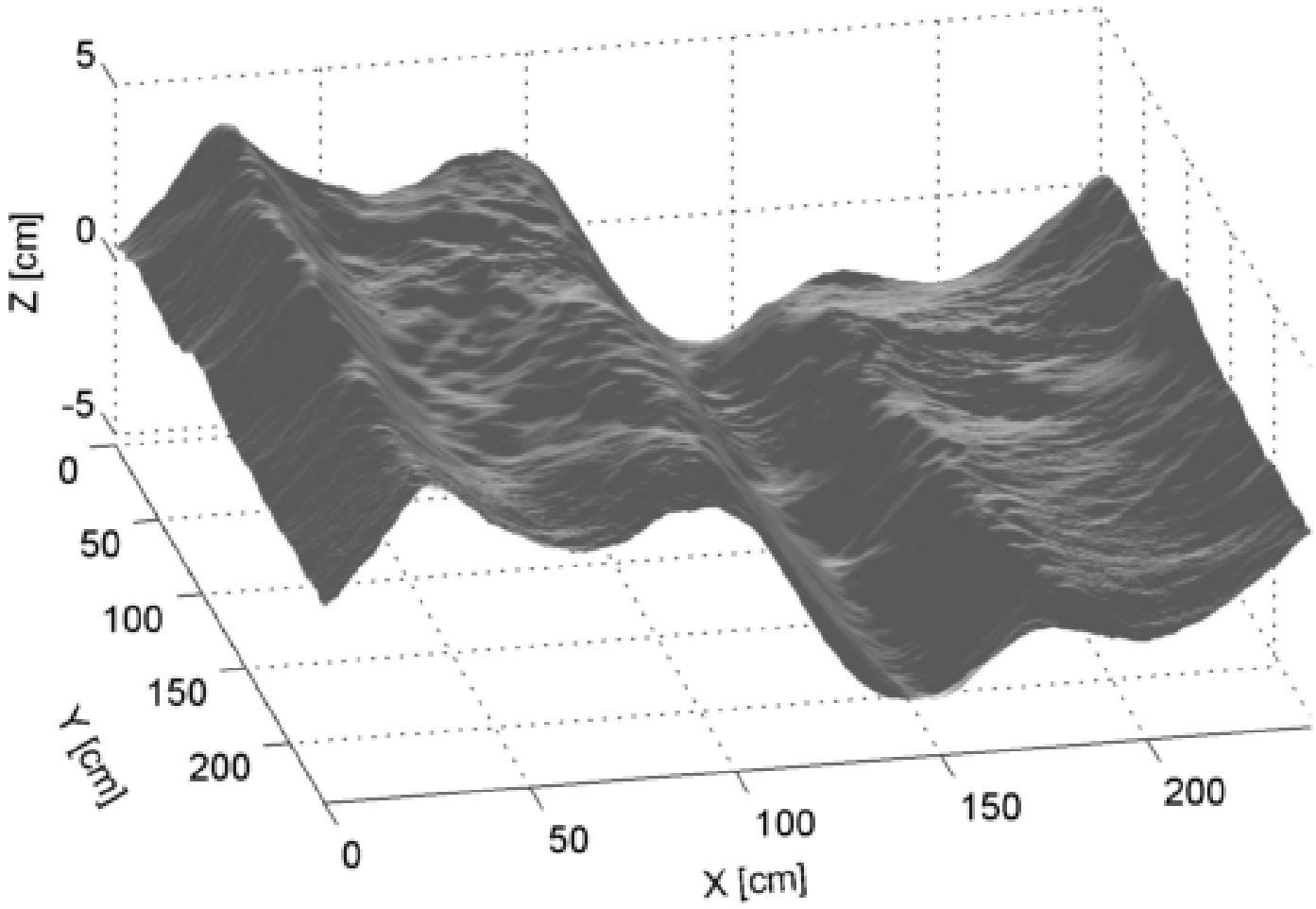


Figure 4.5.: a Sketch of the polarimeter setup at the small towing tank at the HSVA. On the right hand side the light source is illuminating the ceiling. The polarimeter sees the reflection of the ceiling at the water surface. **b** Photo of the polarimeter setup.

Aufbau bei Hamburger Schiffs- und Versuchsanstalt HSVA (Bauer, 2013)

1288 EMVA Standard Compliant

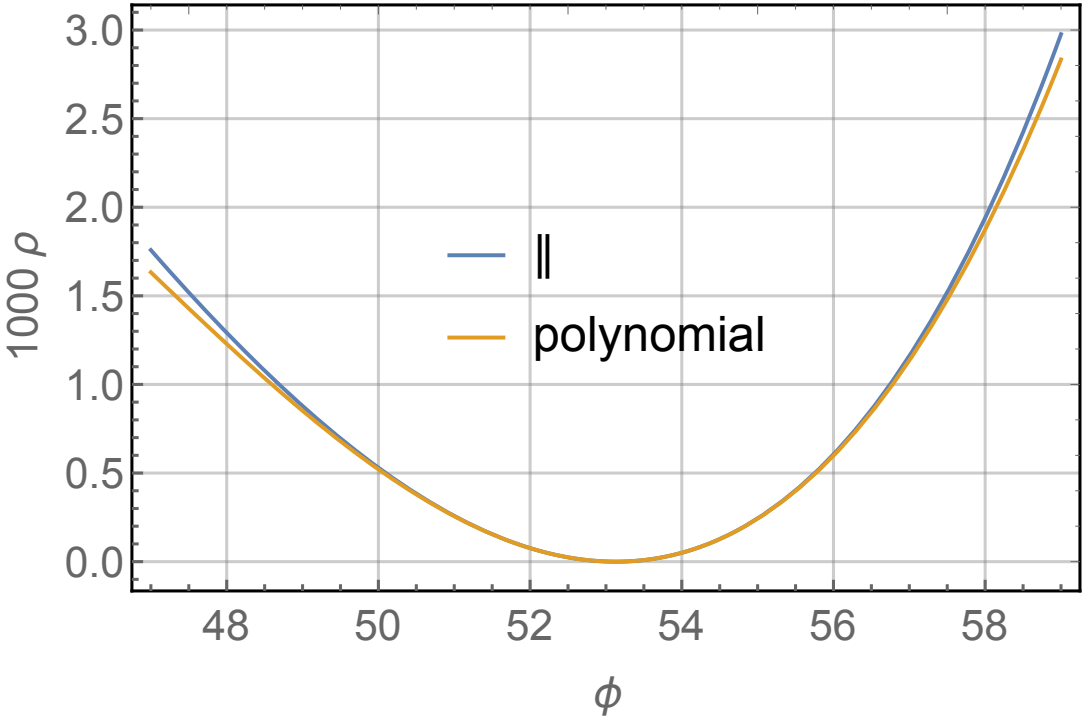
Beispiel: 3-D Rekonstruktion von Wasserwellen



3D-Rekonstruktion einer steilen Wasserwelle (Bauer, 2013)

1288 EMVA Standard Compliant

Brewster Angle Microscopy (BAM)

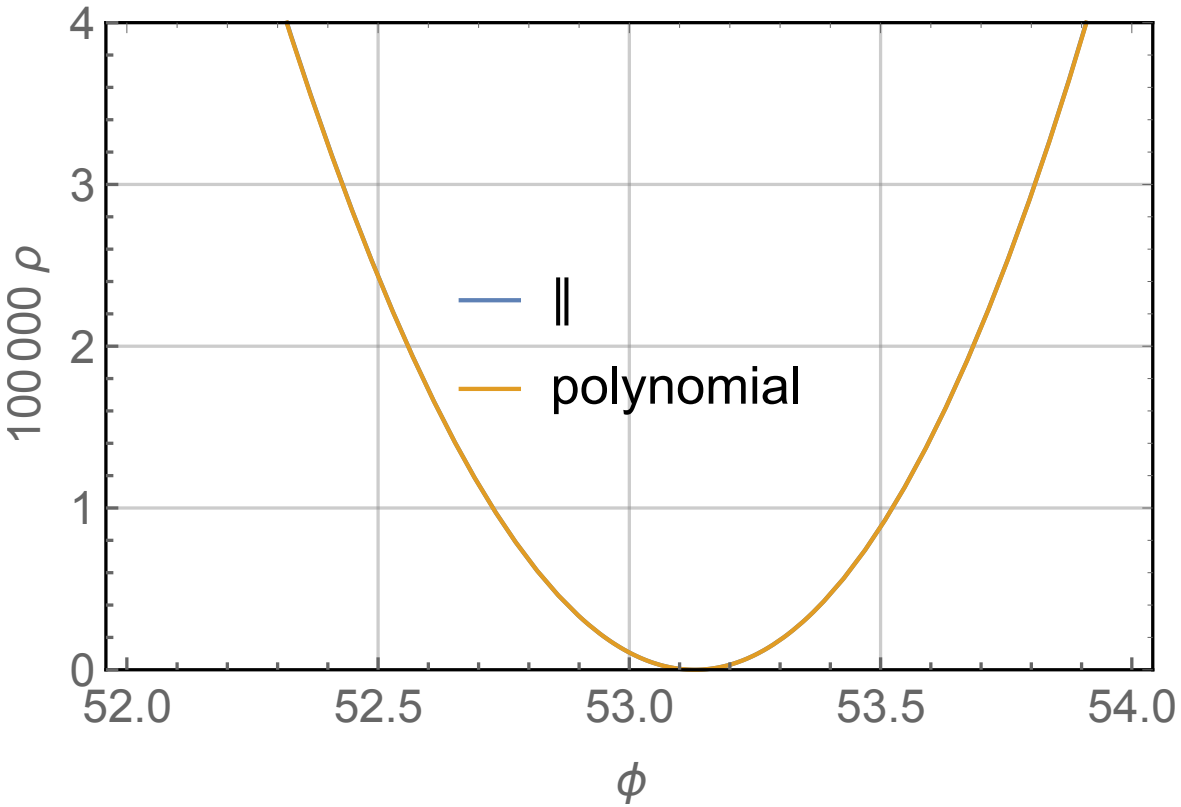


(Quelle: Wikipedia)

Beispiel Wasser: Reflexion parallel polarisiertes Licht kleiner als 0.1% bei 53 ± 4°

1288 EMVA Standard Compliant

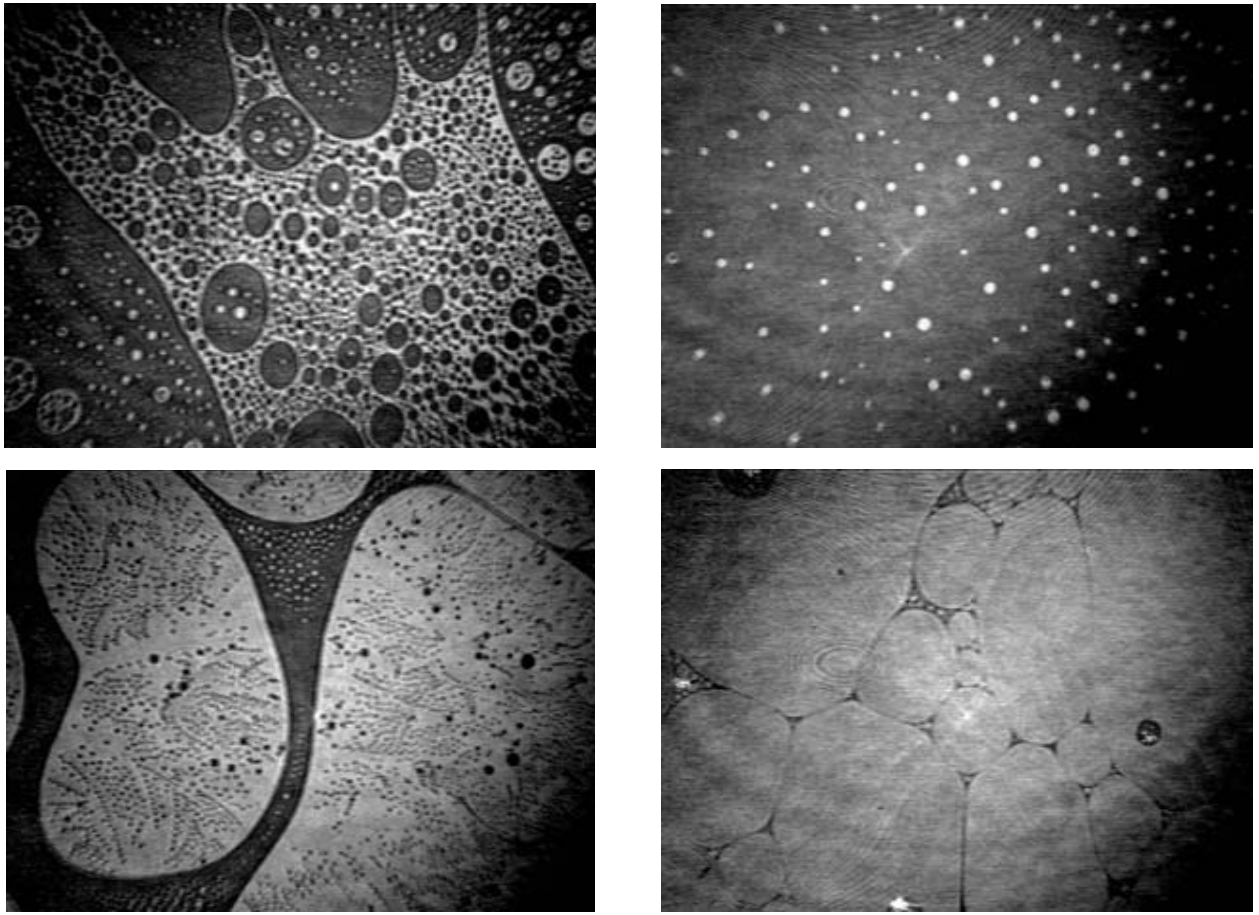
Brewster Angle Microscopy (BAM)



- Reflexion kleiner als 1/100 000 (10^{-5}) bei 53.1 ± 0.4^o
- Restreflexion im Minimum O(10^{-7}) (Stuart et al., 1996)
- $\rightsquigarrow$: Minimale Verschmutzungen werden sichtbar

1288 EMVA Standard Compliant

Brewster Angle Microscopy (BAM)



Bildausschnitt ca. 35 mm × 50 mm (Hühnerfuss et al., 2006)

Sichtbarmachung monomolekularer Filme auf der Wasseroberfläche

1288 EMVA Standard Compliant

Bildsensoren mit eingebauten Polarisationsfiltern

1288
EMVA Standard Compliant

Eingebaute Polarisationsfilter

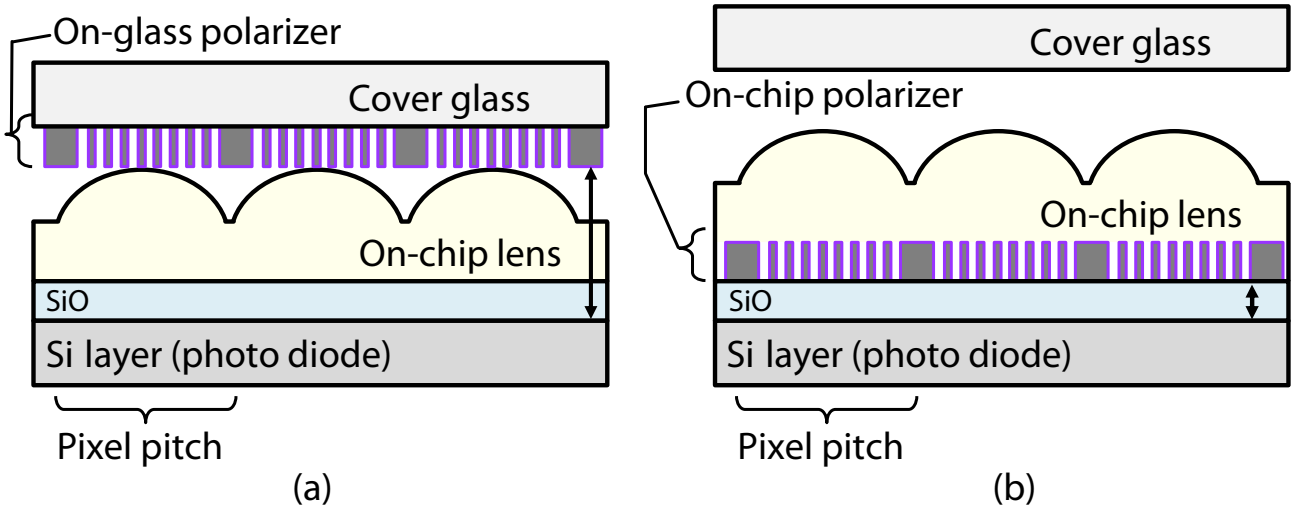


Fig. 3. Device structures of pixel-wise polarizers: (a) Conventional structure. (b) Pixel-wise on-chip polarization image sensor.

Quelle: Yamazaki et al., 2016

- Einbau unter Mikrolinsen direkt über Photodiode
- Auf 2×2 Raster lineare Polarisationsfilter in 0, 45, 90 und 135 Grad Richtung

Eingebaute Polarisationsfilter

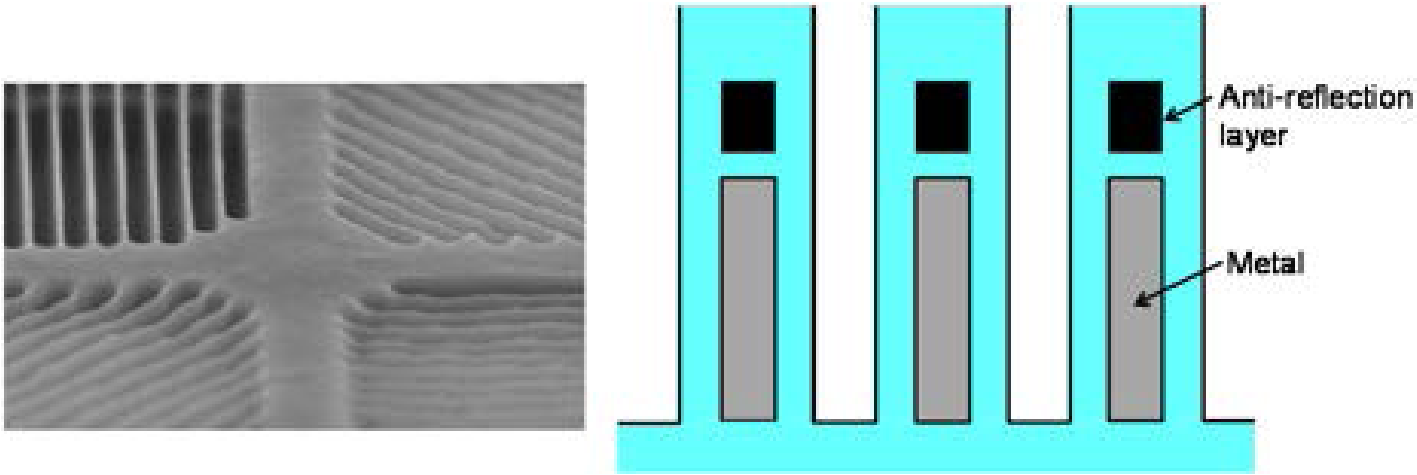
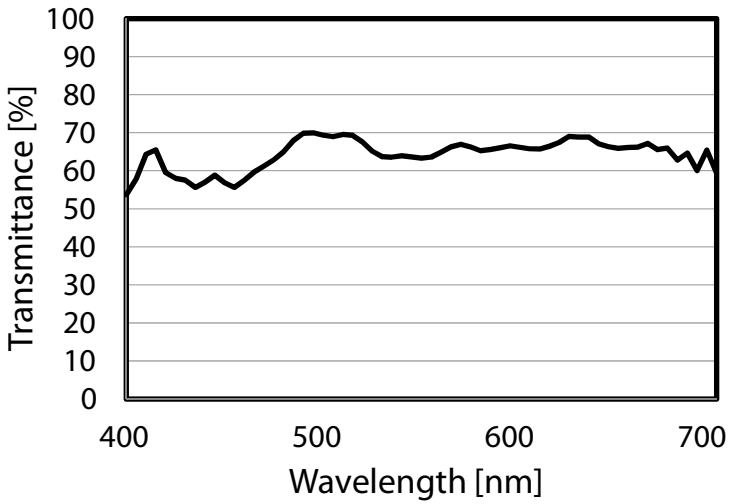


Fig. 5. Photograph and cross-sectional structure of the wire grid.

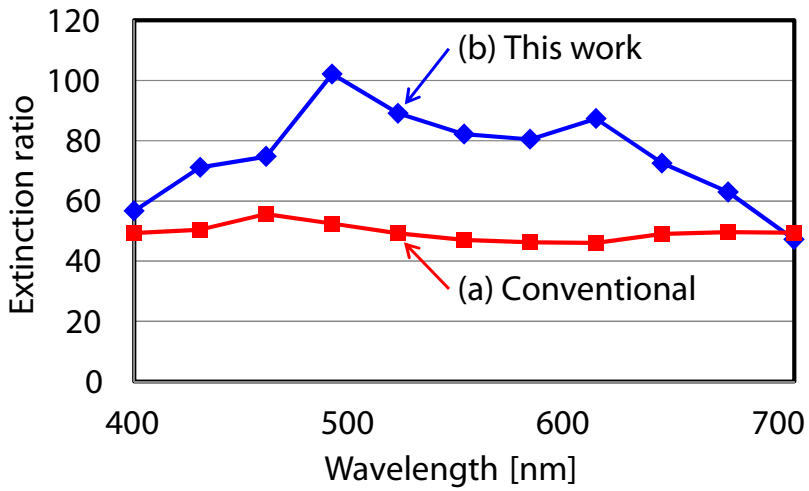
Quelle: Yamazaki et al., 2016

Ausführung als Metallgitter mit Luftspalten und Antireflektionsbeschichtung
Sony Technologiedemonstration mit 2.5 μm großem Pixel

Eigenschaften



Transmission



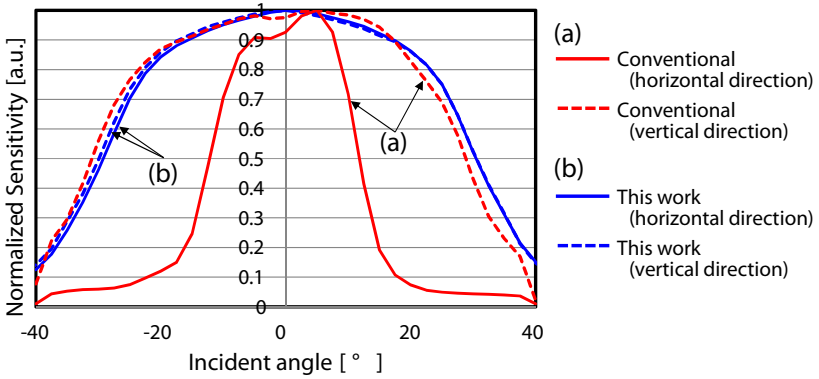
Extinktion

Quelle: Yamazaki et al., 2016

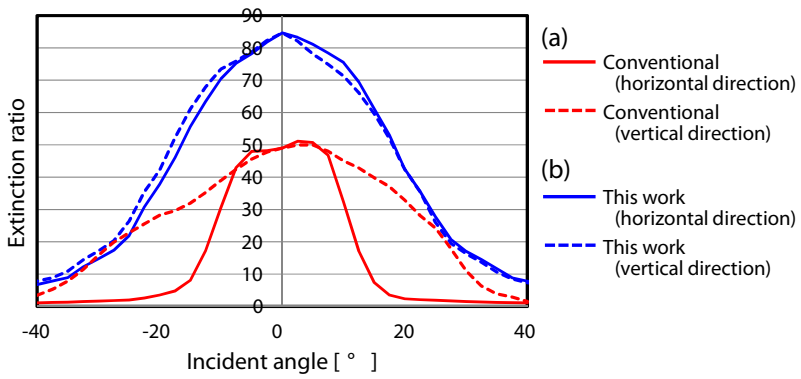
Transmission für durchgelassene Polarisationsrichtung und Extinktion in der Richtung senkrecht dazu

1288 EMVA Standard Compliant

Eigenschaften



Transmission



Extinktion

Quelle: Yamazaki et al., 2016

Abhängigkeit der Empfindlichkeit (links) und der Extinktion (rechts) vom Winkel der auf den Sensor einfallenden Strahlung

1288 EMVA Standard Compliant

Sony Pregius Sensor IMX250MZR

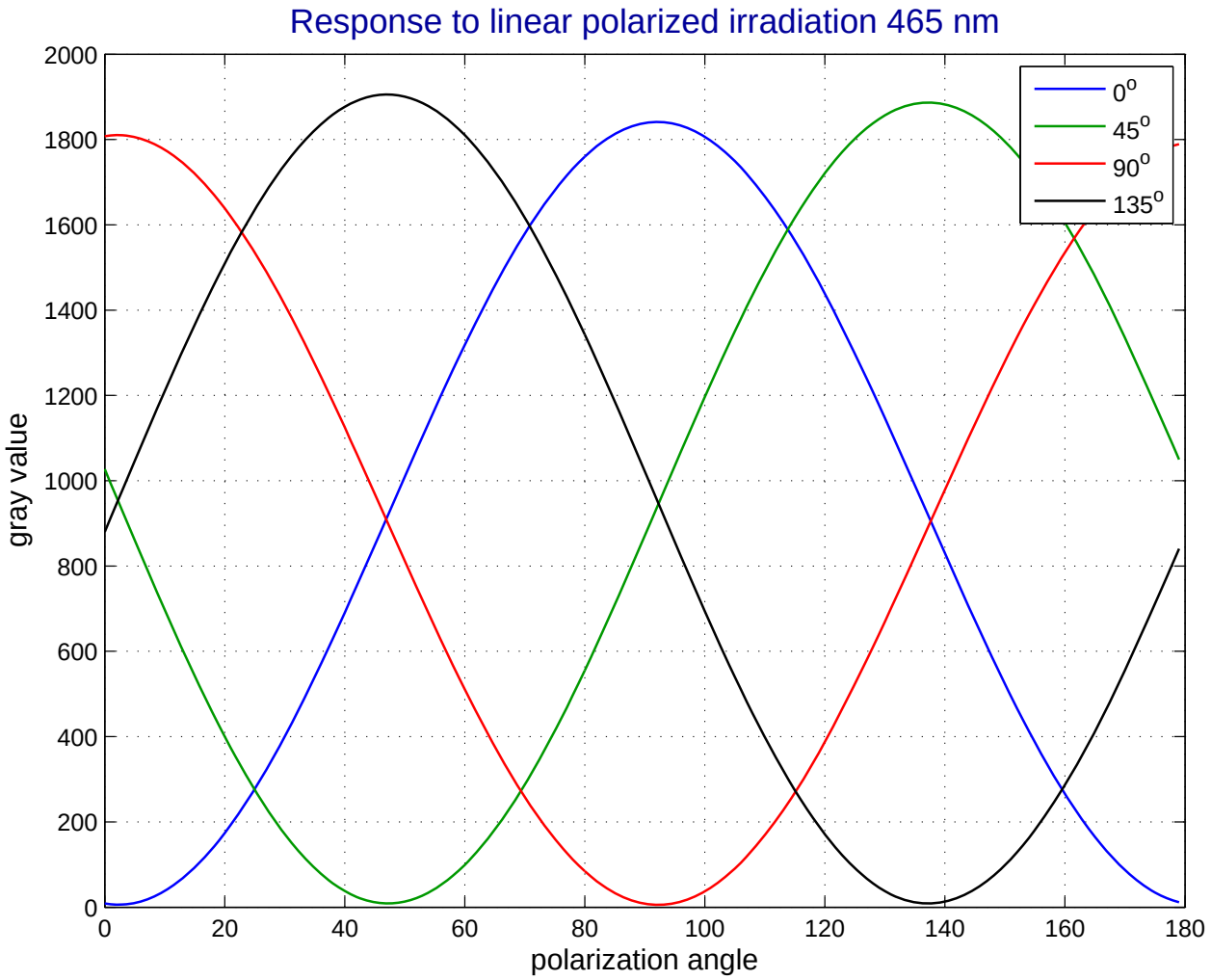
Polarizationsbildsensor IMX250MZR (Daten von Vorserie)

- Pregius Global Shutter CMOS, 2. Generation
- 2464×2056, $3.45\,\mu$m Pixel
- Quantenausbeute (unpolarisiertes Licht): 17.5% Peak
  Entsprecht ca. 54% Transmission der Polarisationsfilter
- Dunkelrauschen, Sättigungskapazität, DR, $\mathrm{SNR}_{\mathrm{max}}$ (0 dB gain)
  $2.05\,\mathrm{e}^-$, $10\,400\,\mathrm{e}^-$, 3784 (71.6 dB), 102
- Dunkelrauschen, Sättigungskapazität, DR, $\mathrm{SNR}_{\mathrm{max}}$ (24 dB gain)
  $1.26\,\mathrm{e}^-$, $625\,\mathrm{e}^-$, 336 (50.5 dB), 25
- DSNU_{1288}: $0.7\,\mathrm{e}^-$

Messungen an einem Prototyp-Kamera von AVT (Manta G-508B)

1288 EMVA Standard Compliant

Verhalten bei linear polarisiertem Licht

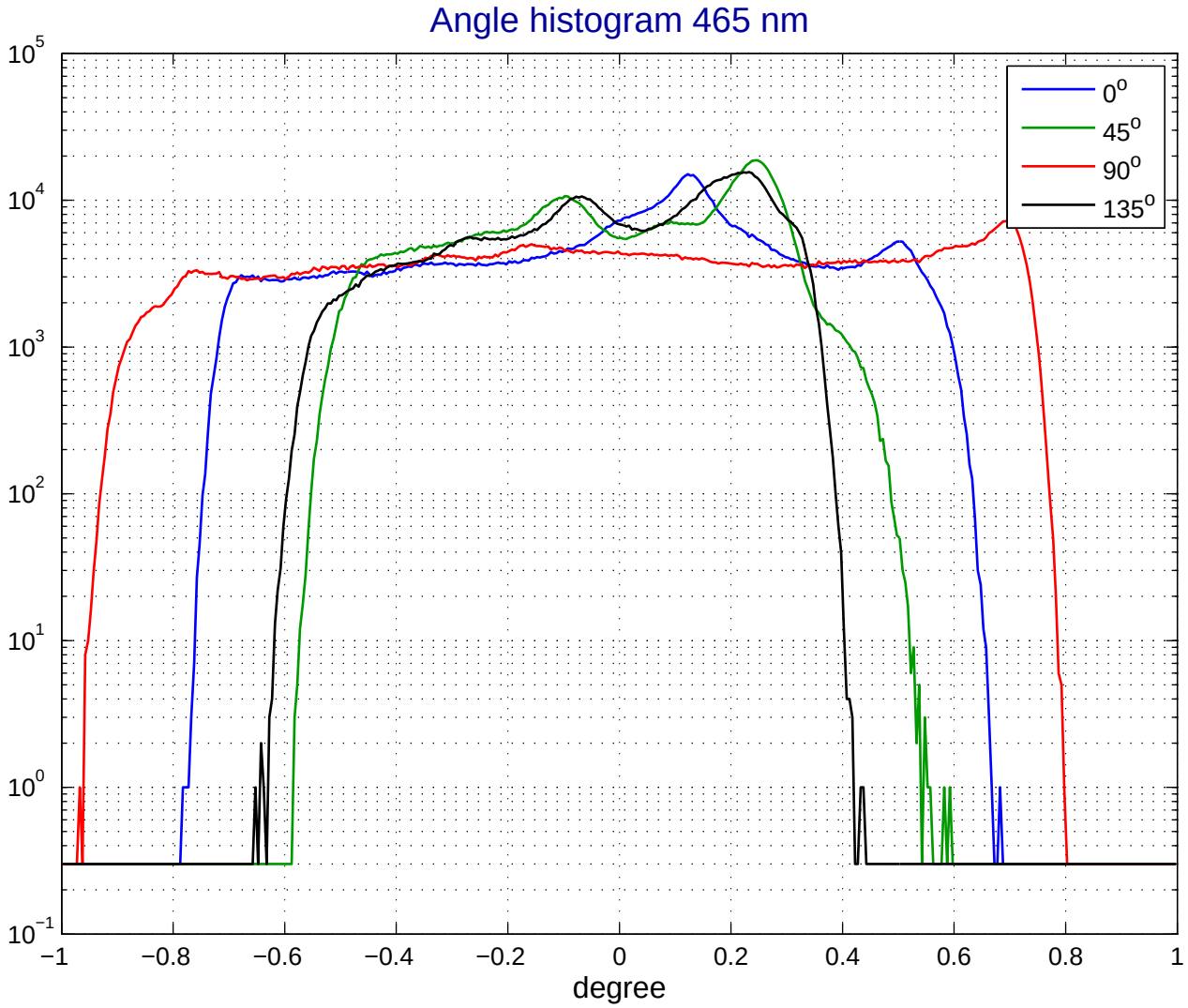


Winkel linear polarisierten Lichts in 1° Stufen von 0 bis 180°

Antwort: $I_{\text{ampl}} cos^2(\theta - \theta_0) + I_0$

1288 EMVA Standard Compliant

Verhalten bei linear polarisiertem Licht

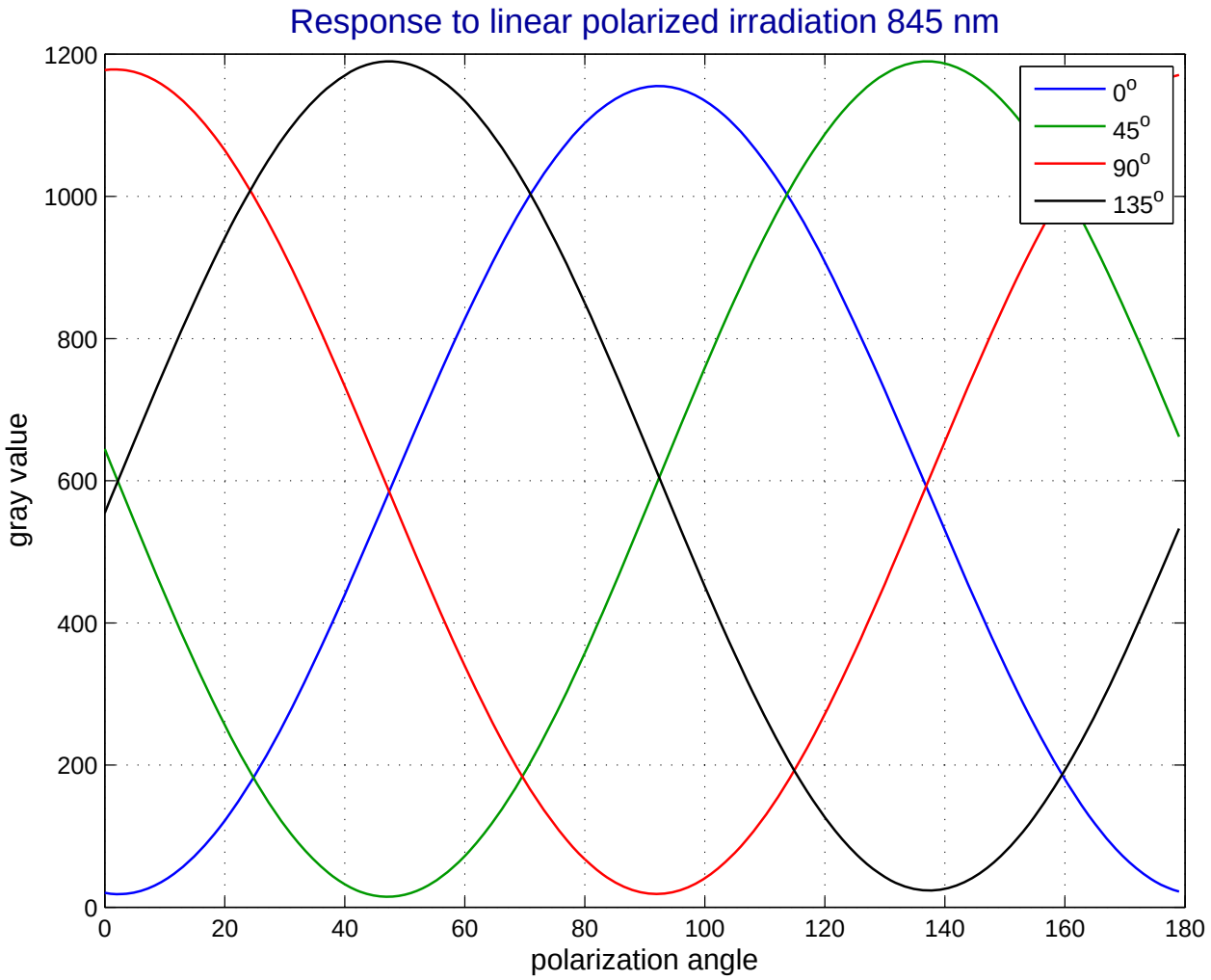


Logarithmisches Histogramm der **Winkel** über alle Pixel

$\sigma_\theta = 0.29^o, 0.21^o, 0.41^o, 0.20^o$

1288 EMVA Standard Compliant

Verhalten bei linear polarisiertem Licht

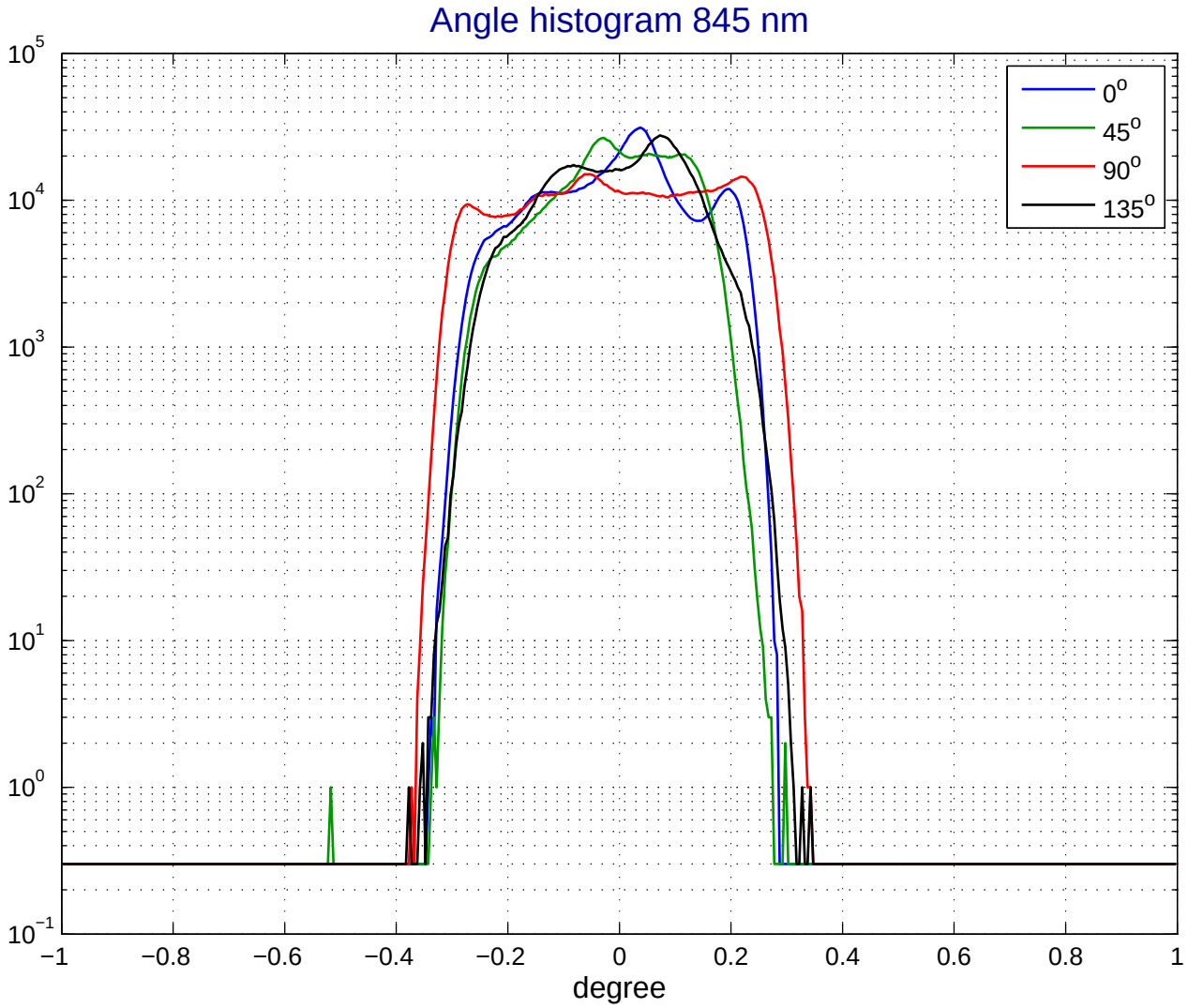


Winkel linear polarisierten Lichts in 1° Stufen von 0 bis 180°

Antwort: $I_{\text{ampl}} cos^2(\theta - \theta_0) + I_0$

1288 EMVA Standard Compliant

Verhalten bei linear polarisiertem Licht

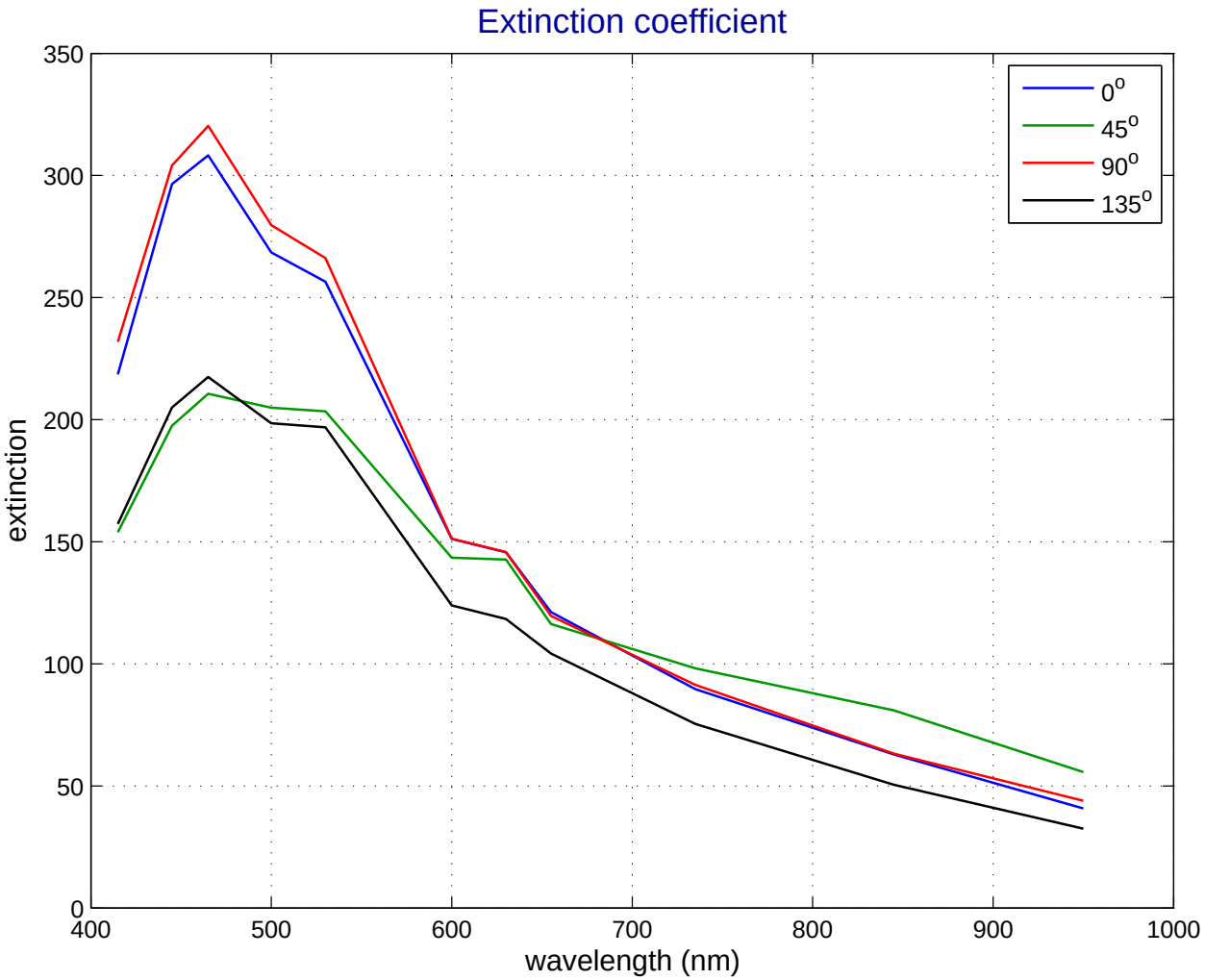


Logarithmisches Histogramm der **Winkel** über alle Pixel

$\sigma_\theta = 0.12^o, 0.10^o, 0.16^o, 0.11^o$

1288 EMVA Standard Compliant

Verhalten bei linear polarisiertem Licht



Wellenlängenabhängige **Extinktion**

1288 EMVA Standard Compliant

Zusammenfassung und Ausblick

Polarisationsbildgebung trägt mit einfachen Mitteln zur visuellen Inspektion und Computer Vision bei:

- Leichte Unterdrückung spekularer Reflexionen
- Vollständige Bestimmung der Oberflächennormale glatter dielektrischer Oberflächen (vergleichbar mit *Fotometrischem Stereo* bei rauen Oberflächen)
- Polarisationskameras mit linearen Polarisationsfiltern vereinfachen Einsatz erheblich
- (Unerlässliches Hilfsmittel zur Untersuchung anisotropischer Festkörper inklusive spannungsinduzierter Anisotropien)

Entwicklung geht rasant weiter

- Kombinierte Farb- und Polarisationsbildsensoren von Sony (IMX250MY): Bayer- und Polarisationsraster auf 4×4 Pixel
- Hyperspektral- und Polarisationsbildgebung? Polarisierte Lichtfeldaufnahme?

1288 EMVA Standard Compliant

Literatur I

P. Bauer.
Development of an imaging polarimeter for water wave slope measurements.
Masterarbeit, Universität Heidelberg, 2013,
http://dx.doi.org/10.11588/heidok.00015899.

B. Jähne.
Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications.
CRC Press, Boca Raton, 2nd edition, 2004, http://www.crcpress.com/product/isbn/9780849319006.

B. Jähne.
Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung.
Springer, Berlin, 7. Auflage, 2012,
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04952-1.

1288 EMVA Standard Compliant

Literatur II

European Machine Vision Association (EMVA).
EMVA Standard 1288. Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras.
Release 3.0, 29. November 2010
https://zenodo.org/record/10696
Release 3.1, 30. Dezember 2016
www.standard1288.org

H. Hühnerfuss et al.
New chemical insights into the structure and morphology of sea slicks and their geophysical interpretations
Marine Surface Films, Gade, Hühnerfuss, and Korenowski, eds., Springer (2006),
http://dx.doi.org/10.1007/3-540-33271-5

1288 EMVA Standard Compliant

Literatur III

Stilwell, D. J.
Directional energy spectra of the sea from photographs.
J. Geophys. Res., **74**, 1974–1986 (1969)
https://doi.org/10.1029/JB074i008p01974

M. A. Stuart et al.
Design and Testing of a Low-Cost and Compact Brewster Angle Microscope
Langmuir, **12**, 2863–2865 (1996),
http://dx.doi.org/10.1021/la9507592

T. Yamazaki et al.
Four-directional pixel-wise polarization CMOS image sensor using air-gap wire grid on 2.5-μm back-illuminated pixels
2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM),
http://dx.doi.org/10.1109/IEDM.2016.7838378

1288 EMVA Standard Compliant