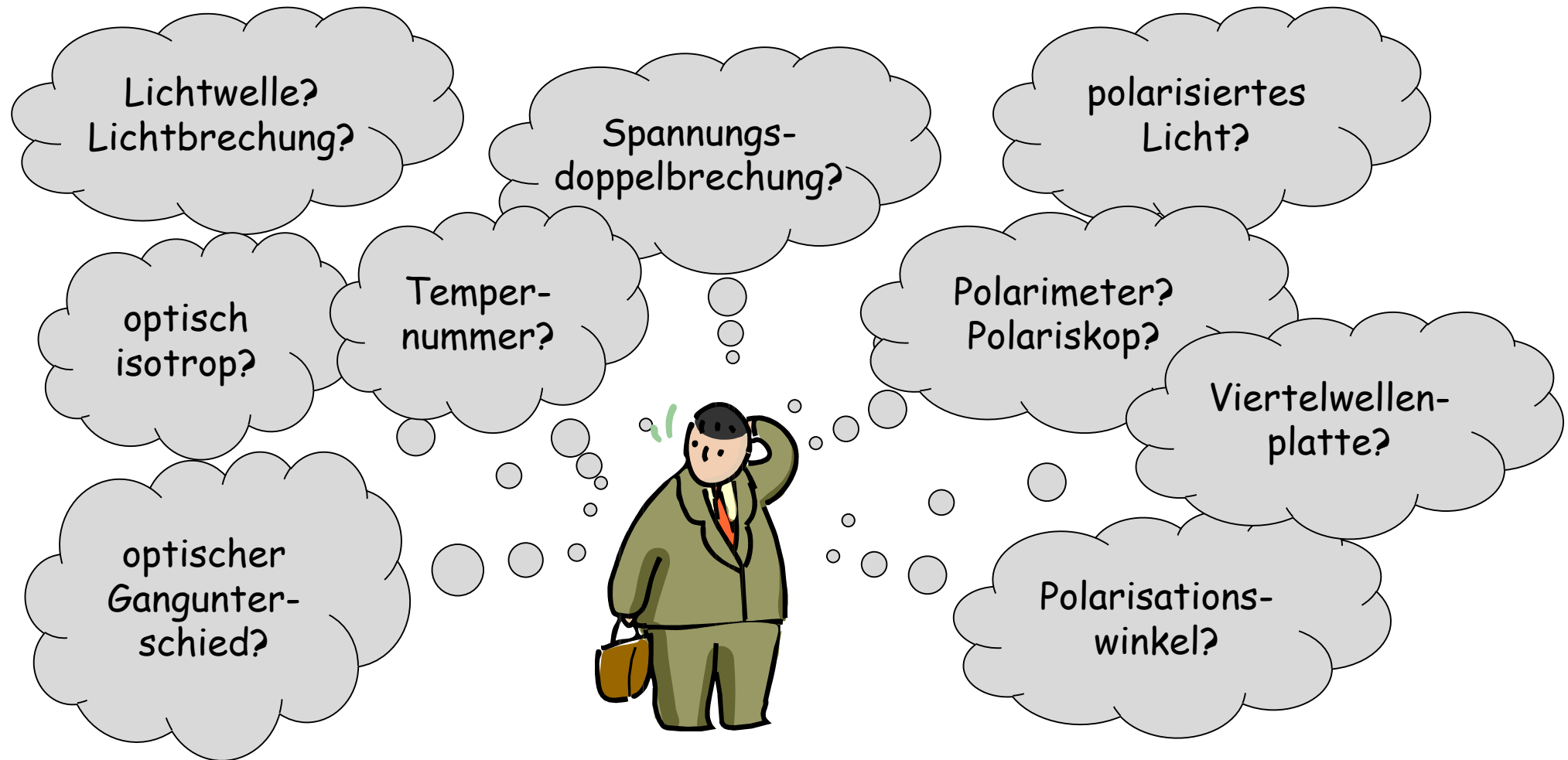


# Grundlagen der Spannungsoptik

**Henning Katte**

ilis gmbh, Erlangen



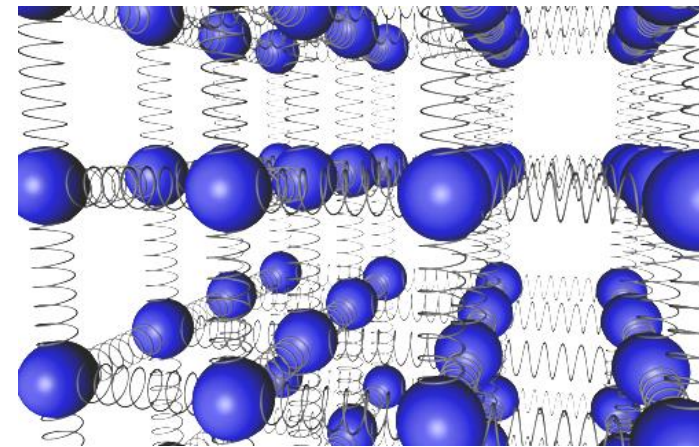
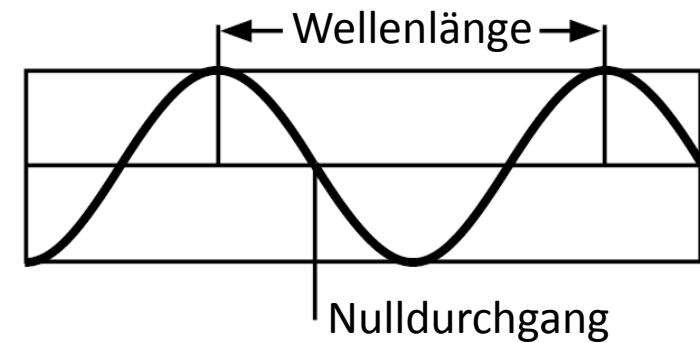


# Was ist „Spannung“?

- Die mechanische Spannung ist ein Begriff aus der Festigkeitslehre, einem Teilgebiet der technischen Mechanik. Sie ist die Kraft pro Flächeneinheit, die in einer gedachten Schnittfläche durch einen Körper, eine Flüssigkeit oder ein Gas wirkt.
- Die mechanische Spannung hat dieselbe physikalische Dimension wie der Druck, nämlich Kraft je Fläche. Der Druck stellt einen Spezialfall der mechanischen Spannung dar.
- Als Maßeinheiten für mechanische Spannung sind in der Praxis Pascal bzw. Newton pro Quadratmeter ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ), sowie davon abgeleitet Megapascal bzw. Newton pro Quadratmillimeter ( $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$ ) üblich.

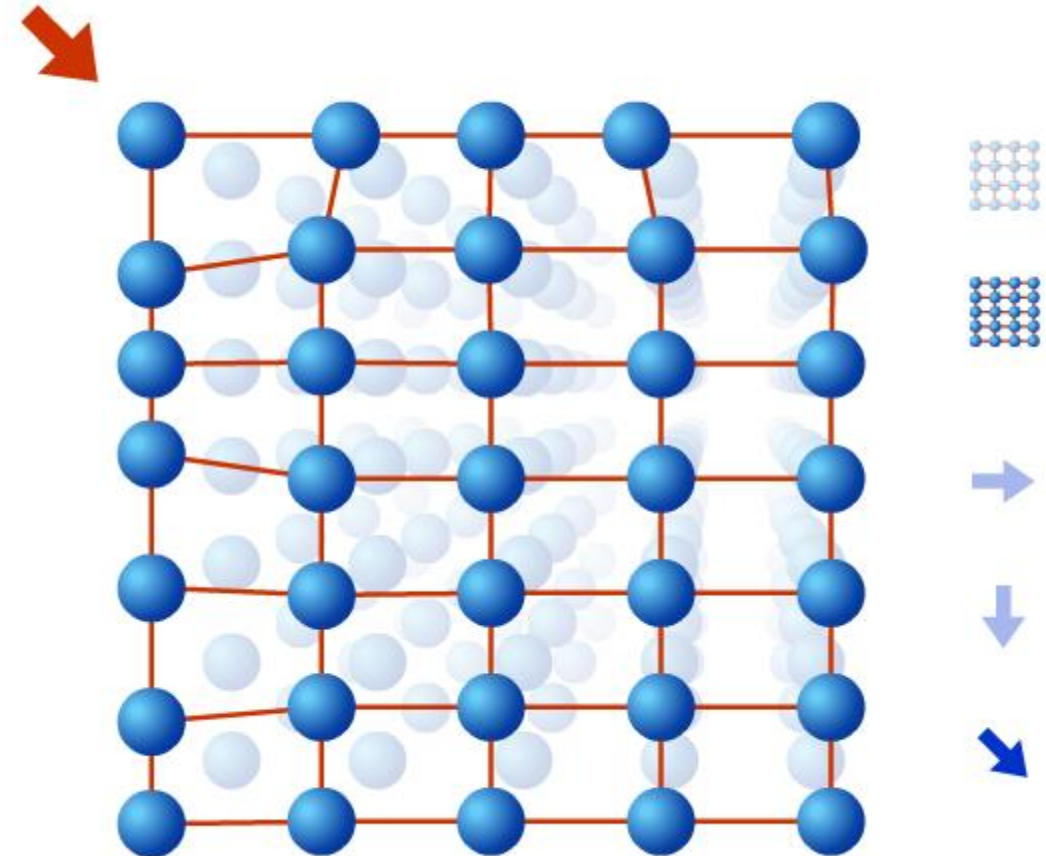
# Licht und Brechzahl

- **Licht** ist eine elektromagnetische Welle, die Atomhüllen zum Schwingen anregt, was wiederum Licht erzeugt.
- Die **Lichtgeschwindigkeit** im Material ist abhängig von der Teilchendichte.
- Die **Brechzahl** ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und im Material:  
$$n = c/v$$
- Gewöhnliches Glas:  $n \approx 1,5$



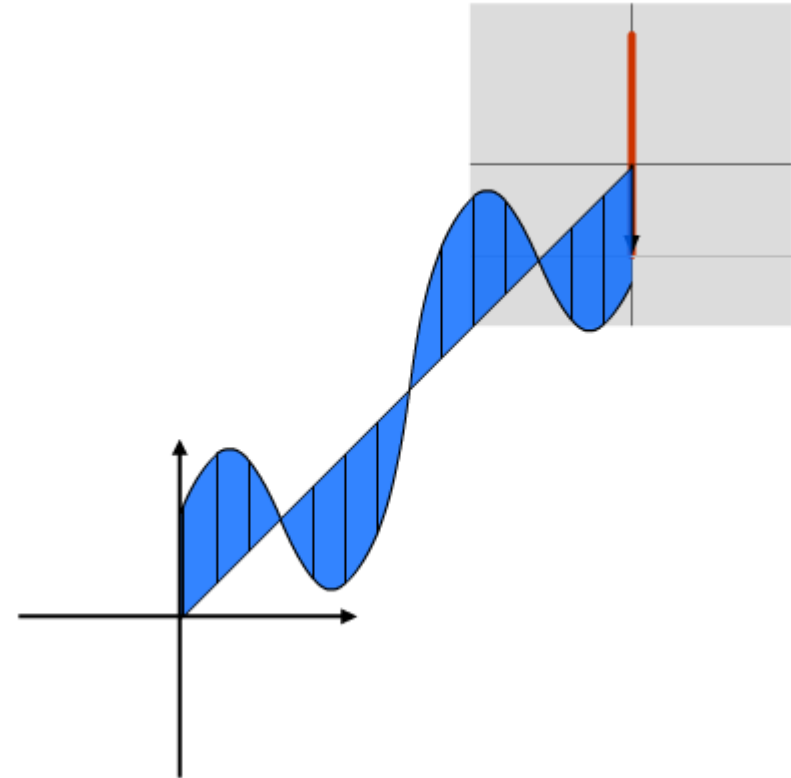
# Spannungsdoppelbrechung

- **Mechanische Spannungen** führen zur Verformung der Materialstruktur, verändern also die Teilchendichte und damit die Lichtgeschwindigkeit.
- Unterscheidet sich die Lichtgeschwindigkeit (und damit die Brechzahl) in den Raumrichtungen, ist ein Material **doppelbrechend**.
- Glas ist normalerweise **optisch isotrop**, wird unter Spannung aber doppelbrechend  
⇒ **Spannungsdoppelbrechung**



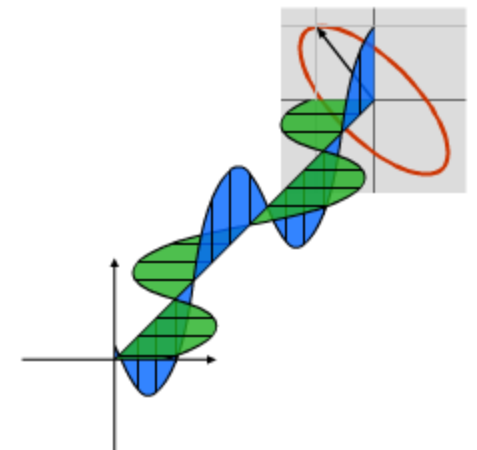
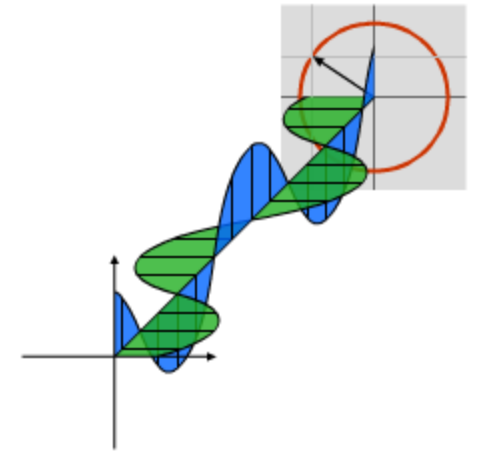
# Lineare Polarisation von Licht

- Schwingt das elektrische Feld des Lichts nur in einer Ebene, spricht man von **linear polarisiertem Licht**.
- Ein (Linear-) **Polarisator** lässt nur solche Lichtwellen passieren, die parallel zu seiner optischen Achse orientiert sind, erzeugt also linear polarisiertes Licht.

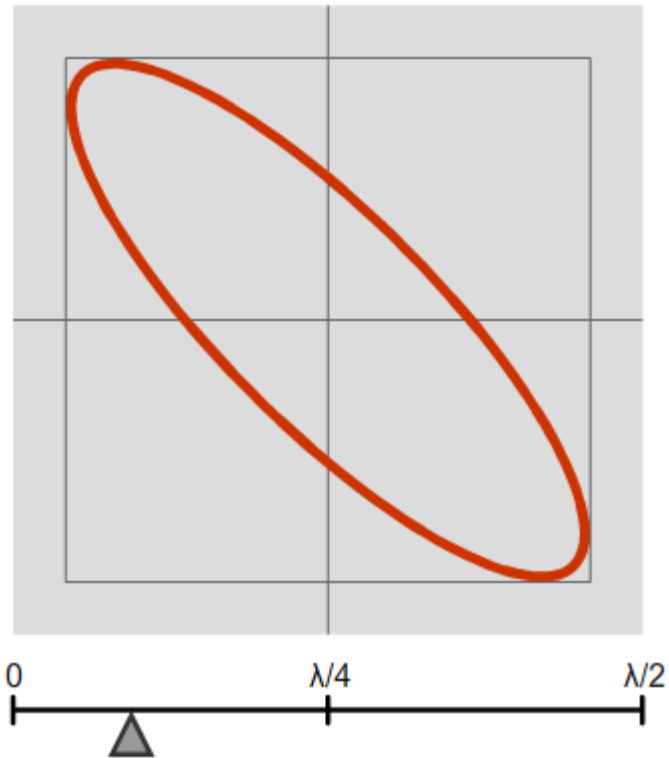


# Zirkulare und elliptische Polarisierung

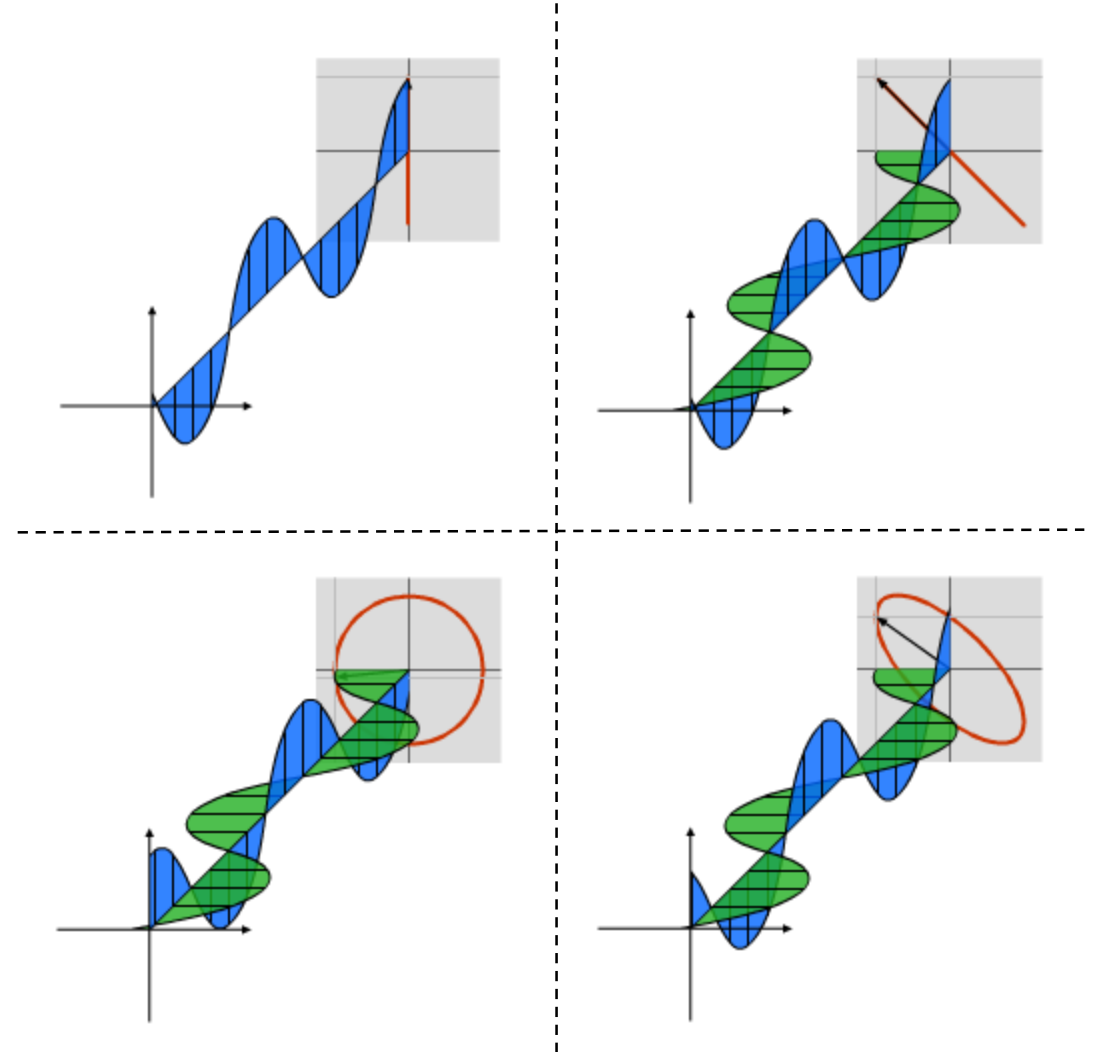
- In einem doppelbrechenden Material breiten sich die Lichtwellen in horizontaler und vertikaler Richtung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus, es kommt zu einem **optischen Gangunterschied**.
- Linear polarisiertes Licht verlässt ein doppelbrechendes Material als Überlagerung von zwei aufeinander senkrecht stehenden Lichtwellen unterschiedlicher Phasenlage.
- Wenn der Gangunterschied genau ein Viertel der Wellenlänge beträgt, ist das Licht **zirkular polarisiert**.
- Im allgemeinen Fall ist das austretende Licht **elliptisch polarisiert**.
- Die Elliptizität ist ein Maß für die Spannungs-doppelbrechung.



# Optischer Gangunterschied

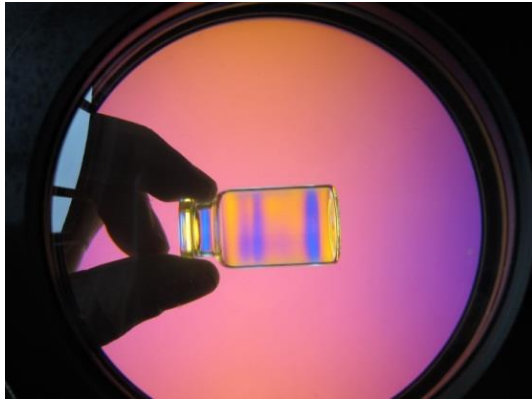


Zusammenhang zwischen Elliptizität  
und optischem Gangunterschied





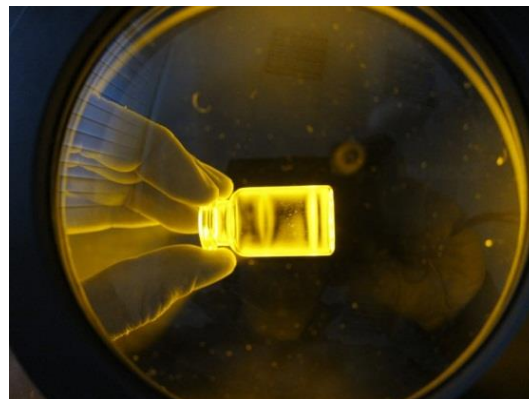
# Polariskop vs. Polarimeter



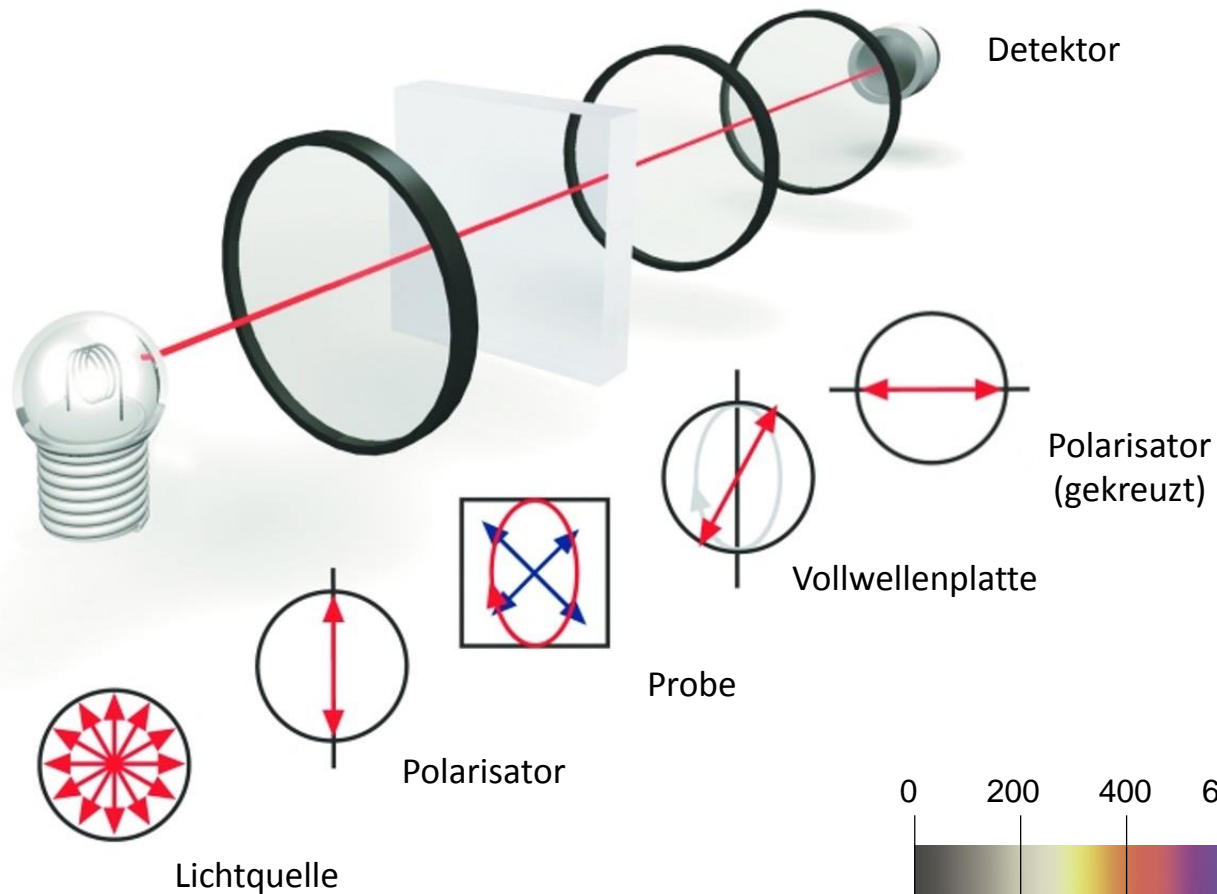
**Polariskope** visualisieren Spannungen durch Interferenzfarben (neutrale Bereiche rot-violett, Bereiche mit Spannungen blau und gelb).

Polariskope erlauben eine schnelle Beurteilung von Spannungen, aber keine genaue Messung.

**Polarimeter** erlauben die Messung an einem bestimmten Messpunkt nach dem Sénarmont-Verfahren.



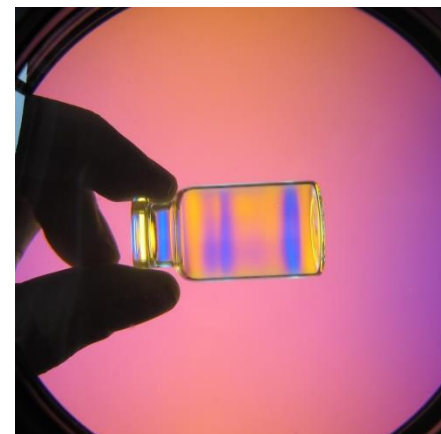
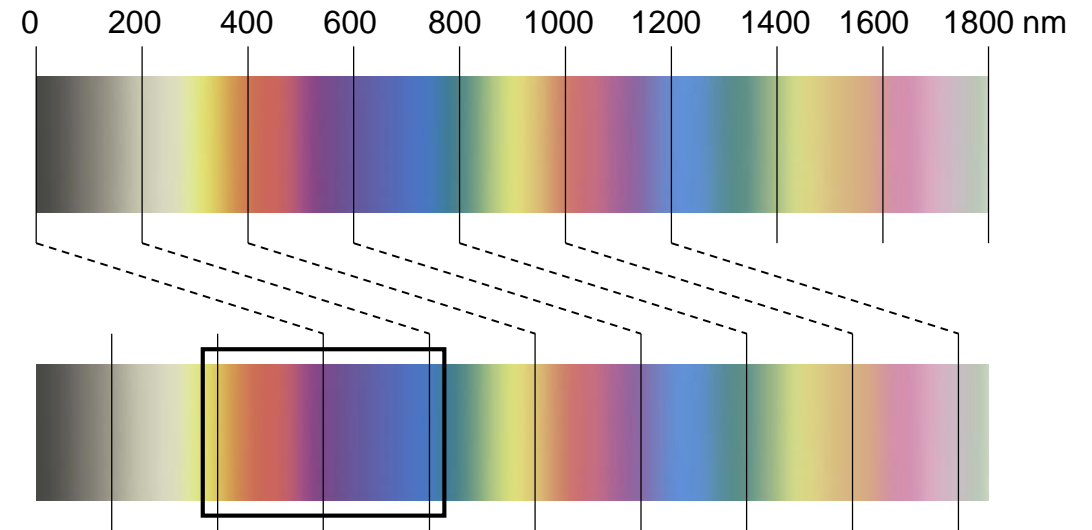
# Polariskop – Aufbau und Funktionsprinzip



- **Polariskope** mit zwei gekreuzten Polarisatoren zeigen bei doppelbrechenden Materialien und weißer Lichtquelle farbige Bilder.
- Spannungsdoppelbrechung erzeugt elliptisch polarisiertes Licht, welches den zweiten Polarisator zum Teil passiert. Der Grad der Auslöschung ist sowohl von der Doppelbrechung als auch von der Wellenlänge abhängig.
- Wird aus dem Spektrum eine Farbe herausgefiltert, nimmt das Restlicht die Komplementärfarbe an. Diese **Interferenzfarbe** kann mit Hilfe von Farbskalen in Verzögerungen übersetzt werden.

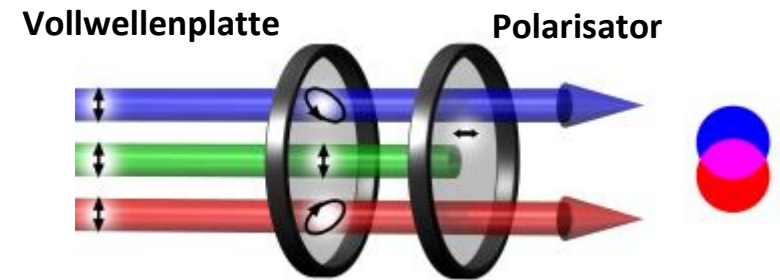
# Vollwellenplatte (Rot 1. Ordnung)

- Bei geringen Verzögerungen ( $< 300$  nm) ist das Bild nicht farbig; verschiedene Verzögerungen verursachen unterschiedliche Grauwerte.
- Durch Hinzufügen einer **Vollwellenplatte** kann die Verzögerung in einen Bereich verschoben werden, der besser auswertbar ist, z.B. um 550 nm.
- Negative Gangunterschiede erscheinen dann in gelb und positive Werte in blau. Neutrale Bereiche sind rot-violett.

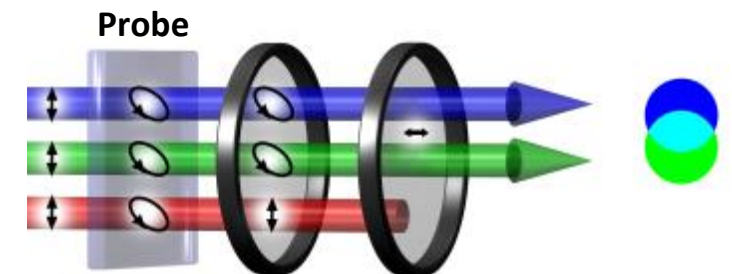


# Vollwellenplatte – Erklärung

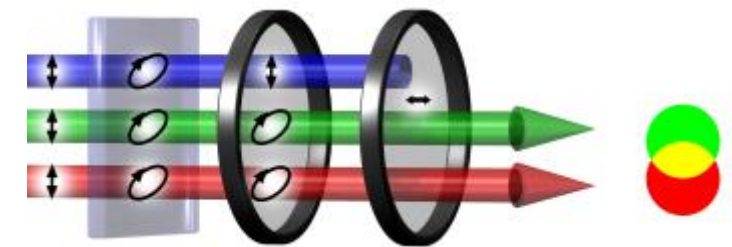
- Ohne Probe ändert sie am Licht mit 550 nm Wellenlänge nichts; Licht anderer Wellenlängen wird jedoch elliptisch polarisiert und teilweise vom Polarisator durchgelassen. Das Spektrum ohne grünes Licht ist rot-blau (**violett**).
- Addiert sich durch die verspannte Probe eine weitere Verzögerung (zum Beispiel  $550 + 100 = 650$  nm), wird rotes Licht herausgefiltert, das Restlicht ist also **türkis**.
- Ist die Verzögerung durch die Probe negativ (z.B. Zug- statt Druckspannung) ergibt sich statt türkis eine **gelbe** Farbe.



a) ohne Probe

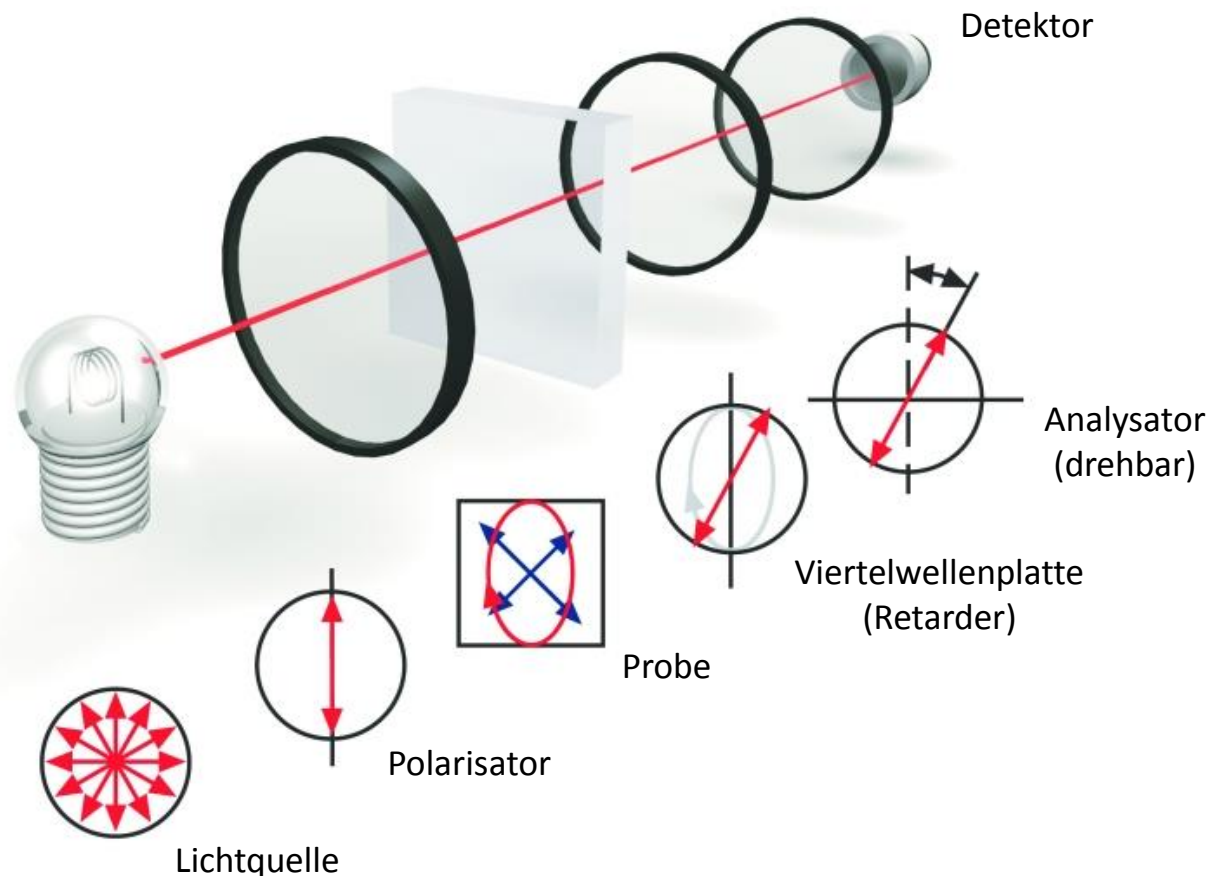


b) Probe mit positivem Gangunterschied



c) Probe mit negativem Gangunterschied

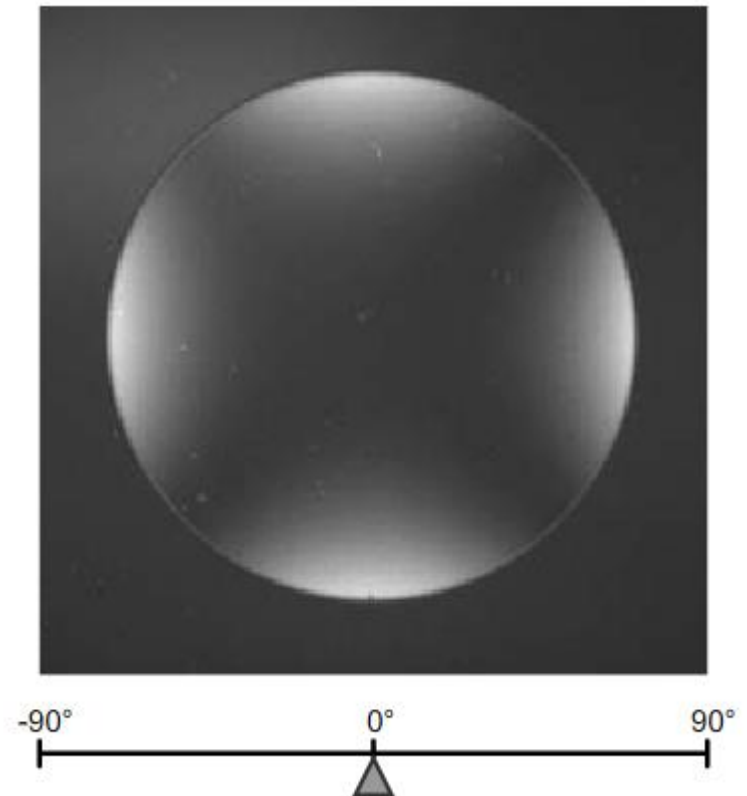
# Polarimeter – Aufbau und Funktionsweise



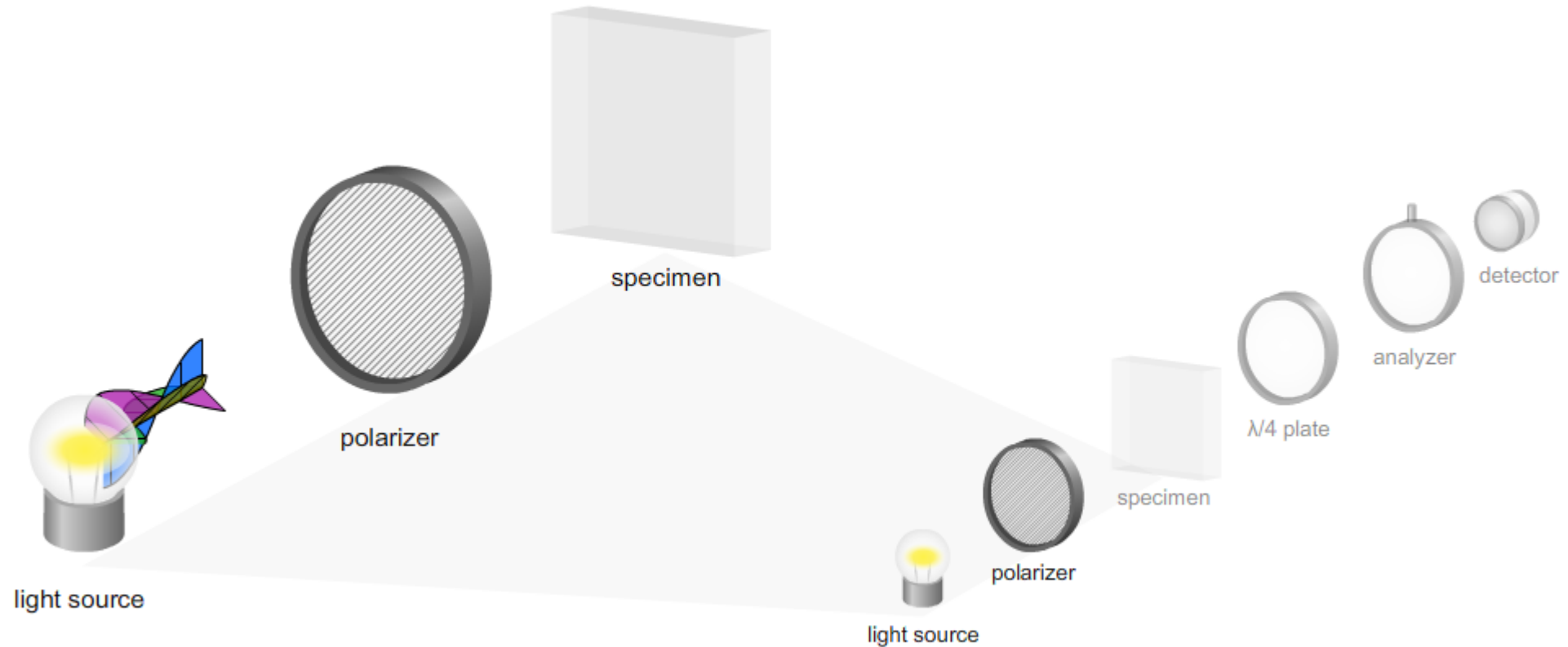
- Der Polarimeter-Aufbau ist dem Polariskop-Aufbau sehr ähnlich, statt einer Vollwellenplatte kommt jedoch eine **Viertelwellenplatte** zum Einsatz und der zweite Polarisator (Analysator) ist drehbar angeordnet.
- Eine Viertelwellenplatte besteht aus doppelbrechendem Material und erzeugt einen Gangunterschied von einem Viertel der Wellenlänge (deshalb  $\lambda/4$ -Platte).
- Linear polarisiertes Licht, das in einem Winkel von  $45^\circ$  zu den optischen Achsen einstrahlt, wird in zirkular polarisiertes Licht umgewandelt.
- Umgekehrt wird elliptisch polarisiertes Licht durch die  $\lambda/4$ -Platte wieder in linear polarisiertes Licht umgewandelt, allerdings mit einem anderen Polarisationswinkel.

# Polarimeter – Sénarmont Messprinzip

- Bei Betrachtung durch einen zur ursprünglichen Polarisationsrichtung gekreuzten Polarisator erscheinen verspannte Bereiche der Probe als aufgehellte Stellen im sonst schwarzen Sichtfeld.
- Der **Polarisationswinkel** beschreibt die Elliptizität des aus der Probe austretenden Lichts, ist also ein Maß für die Doppelbrechung und damit für die Spannung im Material.
- Der Polarisationswinkel wird gemessen, indem man den Analysator solange dreht, bis der aufgehellte Bereich maximal dunkel ist.



# Polarimeter – Veranschaulichung



# Verwendete Messeinheiten

- Aus dem Polarisationswinkel  $\alpha$  lässt sich der **optische Gangunterschied**  $R$  in nm nach folgender Formel berechnen:

$$R = \alpha \cdot \lambda / 180^\circ \quad (\lambda = \text{verwendete Wellenlänge in nm})$$

- Wenn die Doppelbrechung entlang des Messstrahls homogen ist, kann der **normierte Gangunterschied**  $N$  in nm/cm berechnet werden:

$$N = R \cdot (10 / d) \quad (d = \text{Probendicke in mm})$$

- Im Fall von Membranspannungen (und nur dann), kann der optische Gangunterschied in die **Spannung**  $S$  in MPa umgerechnet werden, sofern der fotoelastische Koeffizient (eine Materialkonstante) bekannt ist:

$$S = R / (d \cdot C) \quad (C = \text{fotoelastischer Koeffizient in TPa}^{-1})$$



# Tempergrad (ASTM C 148)

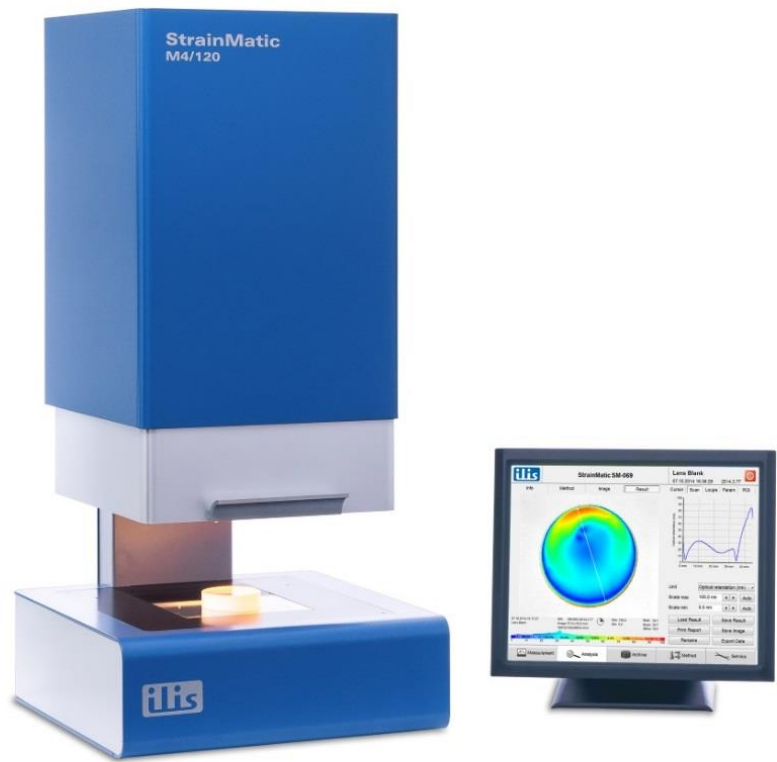
- Um Restspannungen in Behältergläsern zu quantifizieren, definiert die US-amerikanische Norm ASTM C 148-00 die Einheit **scheinbarer Tempergrad** (*apparent temper number*), der auf den Gangunterschied einer sogenannten Strain Disk (die ursprünglich zum visuellen Vergleich verwendet wurden) zurückgeführt ist:

$$T_A = R / 22,8 \text{ nm}$$

- Bei Berücksichtigung der Probendicke (Boden- oder Wandstärke)  $d$  lässt sich der scheinbare Tempergrad in den **realen Tempergrad** (*real temper number*) umrechnen:

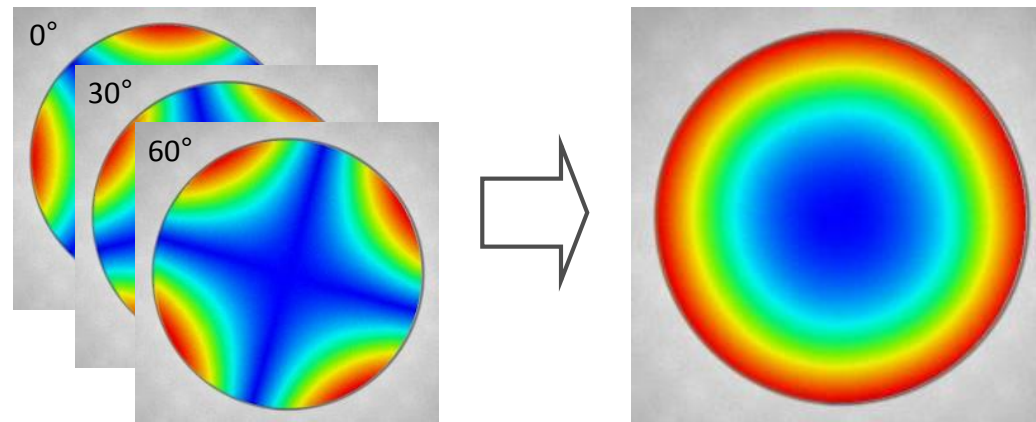
$$T_R = T_A \cdot (4,06 \text{ mm} / d) = (R / 22,8 \text{ nm}) \cdot (4,06 \text{ mm} / d)$$

# Automatische bildgebende Messung



StrainMatic® Bildgebendes Polarimetersystem

- Automatische Bestimmung des Polarisationswinkels für jeden Bildpunkt (Sénarmont-Verfahren)
- Farbkodierte Darstellung der Messwerte
- Kombination von mehreren Messungen unter verschiedenen Polarisierungen zur Vermeidung von „blinden Flecken“ und Bestimmung der Spannungsrichtung

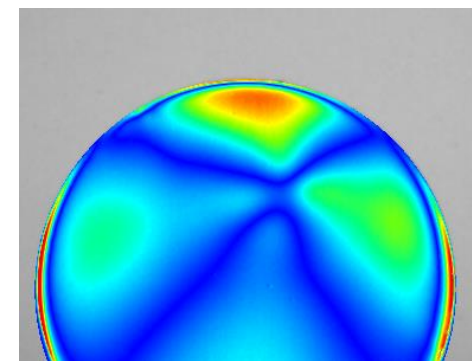
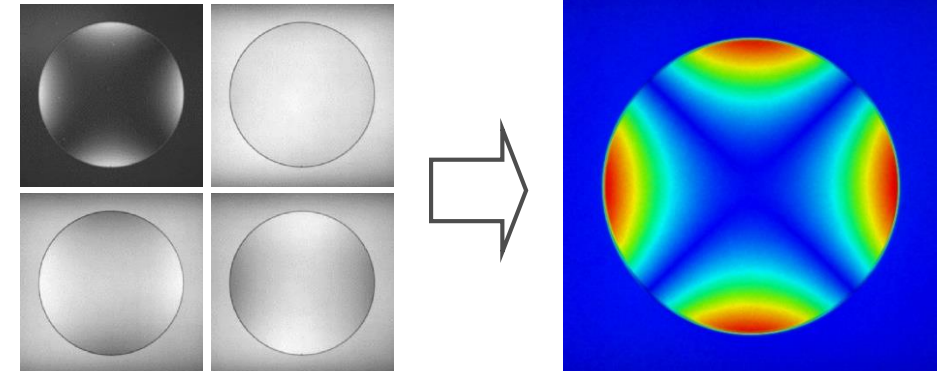
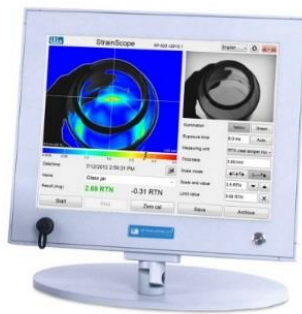


# Kontinuierliche Messung in Echtzeit

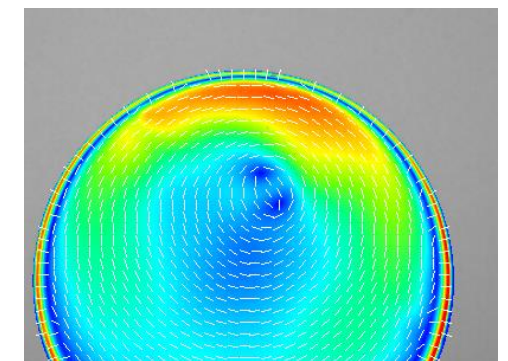
- Drehbarer Analysator ersetzt durch eine spezielle Polarisationskamera ohne bewegliche Elemente
- Messung in Echtzeit (20 Hz), auch an bewegten Objekten und direkt im Prozess
- Messung mit zirkular polarisiertem Licht ermöglicht Bestimmung von korrektem Betrag und Orientierung der Spannungen



StrainScope® Echtzeit-Polarimeter



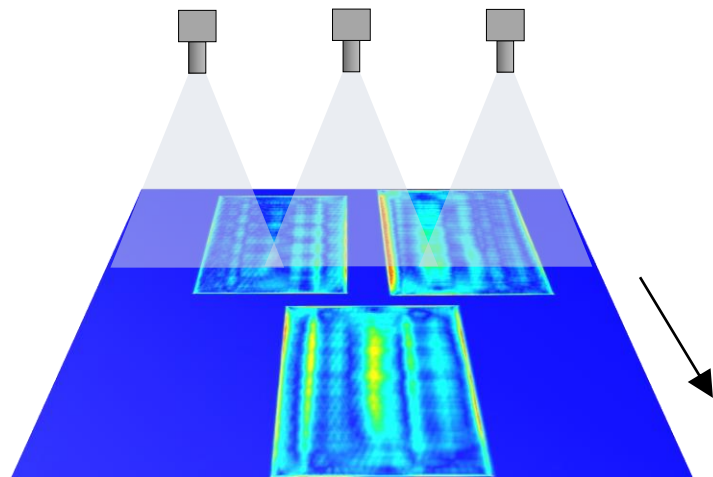
linear polarisiert



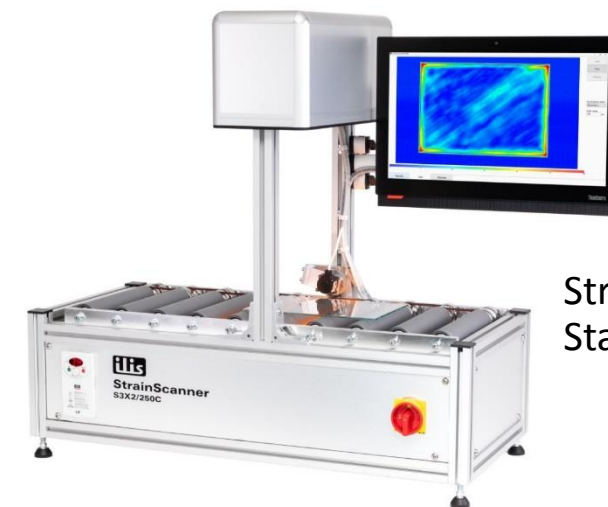
zirkular polarisiert

# Scannende Messung

- Messung von Spannungen und optischen Anisotropien in großformatigen Objekten
- Mehrere Kameras scannen kontinuierlich die vorbeilaufenden Objekte
- Das Gesamtergebnis wird automatisch aus unzähligen Einzelbildern zusammengesetzt



StrainScanner™ Inline Polarimeter



StrainScanner™ Standalone