

## 8. Polarisatoren



Der Polarisationszustand des Lichtes wird durch drei Parameter beschrieben, die Orientierung (links oder rechts), den Grad der Elliptizität und der Richtung der Hauptachse der Ellipse. Der Normalzustand der Polarisation ist elliptisch. Lineare oder

zirkulare Polarisation stellen Spezialfälle dar. Die optischen Polarisationskomponenten basieren auf zwei fundamentalen Phänomenen der Polarisation durch Reflexion und der Polarisation durch Doppelbrechung.

### 8.1. Brewster-Platten-Polarisator

Nach den Fresnelschen Formeln für die Reflexion wird bei einem bestimmten Einfallswinkel, dem Brewsterwinkel  $\alpha_B = \arctan(n_{\text{Glas}}/n_{\text{Luft}})$ , die parallel zur Einfallsebene schwingende Komponente nicht reflektiert. Damit enthält der reflektierte Lichtstrahl nur die senkrecht schwingende Komponente und ist vollständig linear polarisiert.

Für die Reflexionskoeffizienten  $r_s$  und  $r_p$  gilt :

$$r_s = \sin^2(2\alpha_B - 90^\circ)$$

$$r_p = 0$$

Die transmittierte Komponente enthält beide Schwingungsrichtungen.

| Beispiele für Brewsterwinkel $\alpha_B$ und Reflexionsgrade $r_s$ |                 |        |            |        |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|------------|--------|
| Material                                                          | $\lambda$       | n      | $\alpha_B$ | $r_s$  |
| Quarzglas                                                         | 546,1 nm        | 1,460  | 55,6°      | 13,1 % |
| N-BK7                                                             | 546,1 nm        | 1,5167 | 56,6°      | 15,5 % |
| N-SK2                                                             | 546,1 nm        | 1,6099 | 58,2°      | 19,8 % |
| CaF <sub>2</sub>                                                  | 5 $\mu\text{m}$ | 1,3991 | 54,4°      | 10,4 % |
| Ge                                                                | 5 $\mu\text{m}$ | 4,02   | 76,0°      | 78,0 % |
| Si                                                                | 5 $\mu\text{m}$ | 3,43   | 73,7°      | 71,0 % |

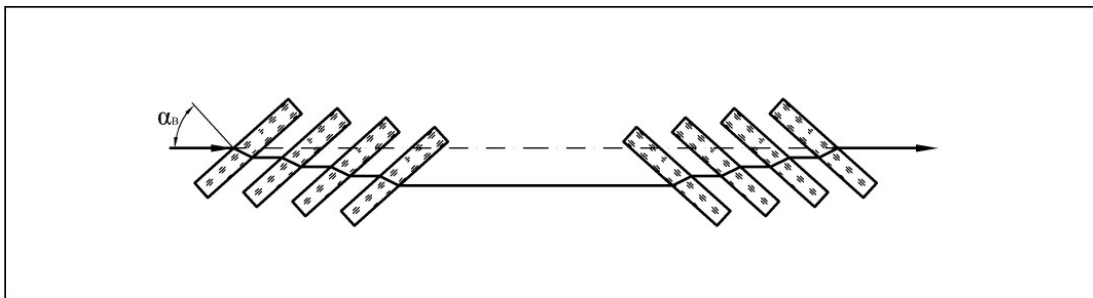
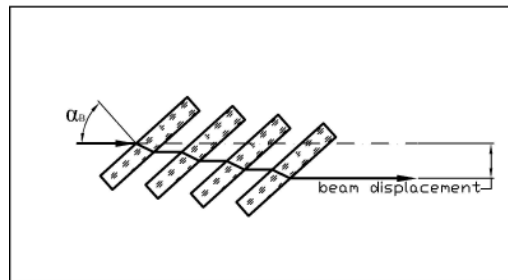
## Vielplatten-Polarisatoren

Polarisatoren, die auf einer Einfachreflexion im Brewsterwinkel basieren, sind in ihren technischen Daten den planparallelen Platten identisch (siehe Abschnitt 5).

Der Grad der Polarisierung, resultierend von einer einzigen Reflexion, ist relativ gering und in der Praxis wird eine Zahl von Platten parallel zueinander angeordnet. Der Kontrast  $K$  eines solchen Polarisators, bestehend aus  $N$  Platten, wird durch das Verhältnis der transmittierten Intensitäten mit p- und s-Polarisation beschrieben.

$$K = \frac{T_P}{T_S} = \left( \frac{n^2 + 1}{2n} \right)^{4N}$$

Wir fertigen Mehrplatten-Polarisatoren in verschiedenen kundenspezifischen Ausführungen an. Zwei Varianten sind nachfolgend dargestellt. Während bei der ersten einfachen Variante ein Strahlversatz zu verzeichnen ist, kann dieser durch die Hinzufügung entgegengesetzt orientierter Platten kompensiert werden.



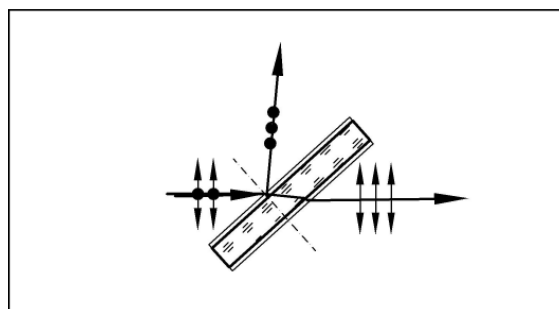
## 8.2. Dielektrische Polarisatoren

### Dielektrische Polarisationsplatten

Der Effekt der Polarisierung durch Reflexion kann wesentlich besser auf Grundlage von dielektrischen Schichten ausgenutzt werden. Gegenüber der Polarisierung durch einfache Reflexion weisen beide Teilstrahlen einen hohen Polarisationsgrad auf.

Dielektrische Polarisationsplatten bestehen aus einer planparallelen Platte mit einer dielektrischen

Vielfachschicht, die für eine Wellenlänge die maximale Differenz zwischen den Koeffizienten für die p- und s-Polarisation erzeugt. Der Polarisator wird im optischen Strahlengang im Brewsterwinkel justiert. Er ist für eine spezielle Wellenlänge konstruiert. Das typische Kontrastverhältnis beträgt 500:1.



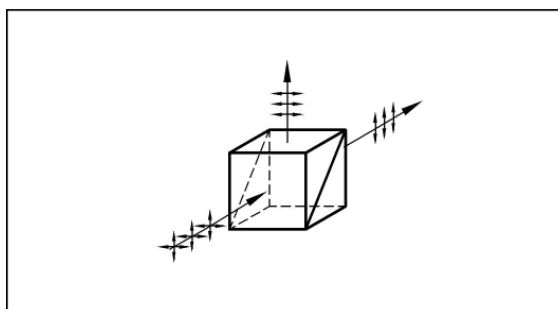
| Technische Daten – Dielektrische Polarisationsplatten |                        |
|-------------------------------------------------------|------------------------|
|                                                       | Standardwerte          |
| Material                                              | Kundenspezifikation    |
| Maßbereich (Kantenlänge bzw. Durchmesser)             | 5 ÷ 50 mm              |
| Maßtoleranz                                           | -0,1 mm                |
| Dickentoleranz                                        | ±0,1 mm                |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)                         | 90 %                   |
| Spektralbereich                                       | 500 nm ÷ 1500 nm       |
| Planität (633 nm)                                     | 1 λ pro Zoll           |
| Oberflächenqualität (scratch – dig)                   | 60-40                  |
| Rs                                                    | >99,8 %                |
| Rp                                                    | <10 %                  |
| Ts                                                    | <0,2 %                 |
| Tp                                                    | >90 %                  |
| Kontrastverhältnis                                    | 500:1                  |
| Maximale Belastbarkeit                                | 500 MW/cm <sup>2</sup> |
| Antireflex-Beschichtung                               | Kundenspezifikation    |
| Fassung                                               | Kundenspezifikation    |

Dielektrische Polarisationsplatten können, angepasst an die Anforderungen, auch in anderen Qualitätsstufen gefertigt werden.

### Dielektrische Polarisationswürfel

Dielektrische Polarisationswürfel bestehen aus zwei verkitteten Rechtwinkelp Prismen mit einer dielektrischen Vielfachschicht. Die Transmission für die p-polarisierte Komponente ist sehr hoch. Die s-Komponente wird hingegen reflektiert.

Die dielektrische Schicht wird so aufgebaut, dass immer ein Einfall im Brewsterwinkel vorliegt. Die Würfelhälften werden aus Flintglas hergestellt. Diese Polarisatoren können breitbandig eingesetzt werden, jedoch auf Grund der Kittschicht nur bei geringeren Leistungsdichten.



| Technische Daten – Dielektrische Polarisationswürfel |                     |
|------------------------------------------------------|---------------------|
|                                                      | Standardwerte       |
| Material                                             | Kundenspezifikation |
| Maßbereich (Kantenlänge bzw. Durchmesser)            | 10 ÷ 50 mm          |
| Maßtoleranz                                          | ±0,1 mm             |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)                        | 90 %                |
| Spektralbereich                                      | 500 nm – 1500 nm    |

|                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Planität (633 nm)                   | 1 $\lambda$ pro Zoll  |
| Oberflächenqualität (scratch – dig) | 60-40                 |
| Rs                                  | >99,8 %               |
| Rp                                  | <10 %                 |
| Ts                                  | <0,2 %                |
| Tp                                  | >90 %                 |
| Kontrastverhältnis                  | 500:1                 |
| Maximale Belastbarkeit              | 20 MW/cm <sup>2</sup> |
| Antireflex-Beschichtung             | Kundenspezifikation   |
| Fassung                             | Kundenspezifikation   |

Dielektrische Polarisationswürfel können, angepasst an die Anforderungen, auch in anderen Qualitätsstufen gefertigt werden.

### 8.3. Doppelbrechende Polarisatoren

Die Eigenschaft anisotroper Kristalle, einen auf den Kristall auftreffenden Lichtstrahl in zwei Komponenten zu zerlegen, wird als Doppelbrechung bezeichnet. Die beiden Komponenten werden als ordentlicher und außerordentlicher Strahl bezeichnet. Sie sind senkrecht zueinander linear polarisiert. Für die beiden Komponenten sind unterschiedliche Brechungsindexe relevant, die mit  $n_o$  (ordentlicher Strahl) und  $n_e$  (außerordentlicher Strahl) bezeichnet

werden. Während  $n_o$  richtungsunabhängig ist, weist  $n_e$  ein anisotropes Verhalten auf.

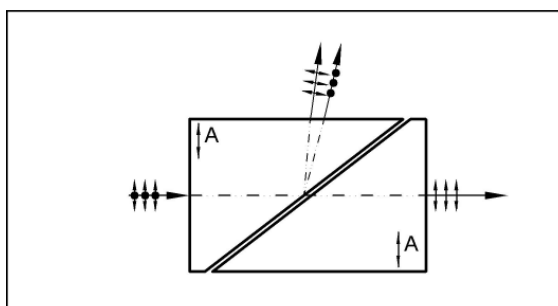
Ein Maß für die Doppelbrechung bietet die maximale Differenz zwischen  $n_o$  und  $n_e$ , die in der Richtung senkrecht zur optischen Achse auftritt.

| Beispiele doppelbrechender Kristalle (Werte gelten für $\lambda = 589,3$ nm) |        |        |             |                        |
|------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------------|------------------------|
| Material                                                                     | $n_o$  | $n_e$  | $n_e - n_o$ | Art der Doppelbrechung |
| CaCO <sub>3</sub>                                                            | 1,6584 | 1,4864 | -0,1720     | Negativ                |
| SiO <sub>2</sub>                                                             | 1,5442 | 1,5533 | +0,0091     | Positiv                |
| LiNbO <sub>3</sub>                                                           | 2,3002 | 2,2147 | -0,0855     | Negativ                |
| MgF <sub>2</sub>                                                             | 1,3780 | 1,3890 | +0,0110     | Positiv                |

#### GLAN-TAYLOR-Polarisatoren

Die Funktionsweise des Glan-Taylor-Polarisators ist ähnlich der des Glan-Thompson-Polarisators. Im Fall des Glan-Taylor-Typs sind die beiden Prismen durch einen Luftspalt mit ca. 0,05 mm Stärke getrennt. Die Luftspaltversion ermöglicht höhere Leistungsdichten im Vergleich zur verkitteten Variante, aber die Akzeptanz wird reduziert. Glan-

Taylor-Polarisatoren werden i.A. so konstruiert, dass die Eintritts- und Austrittsfläche senkrecht zum Strahl liegen. Die inneren Flächen werden so ausgerichtet, dass der ordentliche Strahl an der ersten Fläche total reflektiert wird. In diesem Fall beträgt der Akzeptanzwinkel 8°.

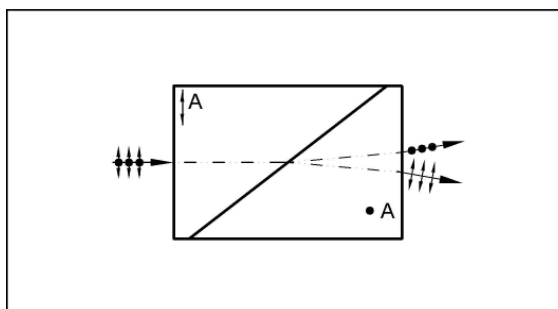


| Technische Daten – GLAN-TAYLOR-Polarisatoren |                                          |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                              | Standardwerte                            |
| Material                                     | Kalkspat                                 |
| Spektralbereich                              | 300 ÷ 2500 nm                            |
| Maßbereich (Kantenlänge)                     | 5 ÷ 20 mm                                |
| Maßtoleranz                                  | ±0,1 mm                                  |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)                | 90 %                                     |
| Parallelität                                 | < 5 arcmin                               |
| Kontrastverhältnis                           | 10 <sup>5</sup>                          |
| Planität (633 nm)                            | λ/4                                      |
| Oberflächenqualität (scratch – dig)          | 60-40                                    |
| Maximale Belastbarkeit                       | cw : < 100 W/cm <sup>2</sup>             |
|                                              | Pulse (10 ns) : < 200 MW/cm <sup>2</sup> |
| Seitenfenster                                | Kundenspezifikation                      |
| Fassung                                      | Kundenspezifikation                      |

### WOLLASTON-Prisma

Dieser Polarisator besteht aus zwei verkitteten Rechtwinkelp Prismen, deren optische Achsen senkrecht zueinander orientiert sind. Daraus folgt, dass der ordentliche Strahl des ersten Prismas zum außerordentlichen Strahl im zweiten Prisma wird.

Die zwei senkrecht zueinander polarisierten Ausgangsstrahlen werden abhängig vom Winkel zwischen Eintrittsfläche und der inneren Fläche in unterschiedliche Richtungen abgelenkt.

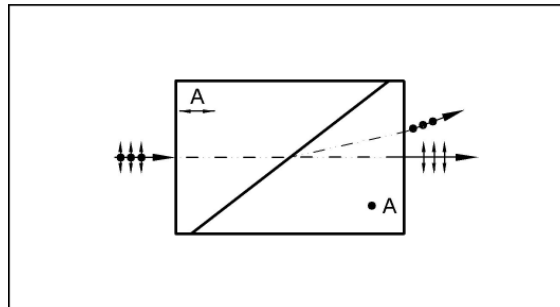


| Technische Daten – WOLLASTON-Prismen |                                          |                 |                  |
|--------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|------------------|
|                                      | Standardwerte                            |                 |                  |
| Material                             | Kalkspat                                 | Quarz           | MgF <sub>2</sub> |
| Spektralbereich                      | 350 ÷ 2500 nm                            | 200 ÷ 2800 nm   | 140 ÷ 6000 nm    |
| Kontrastverhältnis                   | 10 <sup>5</sup>                          | 10 <sup>5</sup> | 10 <sup>5</sup>  |
| Ablenkungswinkel a                   | 1° - 20°                                 | 0,1° - 2°       | 0,1° - 2°        |
| Maßbereich (Kantenlänge)             | 5 ÷ 20 mm                                | 5 ÷ 25 mm       | 5 ÷ 15 mm        |
| Maßtoleranz                          | ±0,1 mm                                  |                 |                  |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)        | 90 %                                     |                 |                  |
| Parallelität                         | < 5 arcmin                               |                 |                  |
| Planität (633 nm)                    | λ/4                                      |                 |                  |
| Oberflächenqualität (scratch – dig)  | 60-40                                    |                 |                  |
| Fassung                              | Kundenspezifikation                      |                 |                  |
| Maximale Belastbarkeit               | cw : < 20 W/cm <sup>2</sup>              |                 |                  |
|                                      | Pulse (10 ns) : < 100 MW/cm <sup>2</sup> |                 |                  |

## ROCHON-Prismen

Diese Polarisatoren ähneln den Wollaston-Prismen. Sie bestehen aus zwei verkitteten Rechtwinkelprismen. Die Prismen sind in Bezug zur optischen Achse derart geschnitten, dass der ordentliche Strahl beim Durchgang durch den Polarisator keine Richtungsänderung erfährt und der außerordentliche Strahl abgelenkt wird. Um diesen Effekt zu erhalten, muß die optische Achse des Eingangsprismas senkrecht zur Eintrittsfläche sein und damit

parallel zum einfallenden Strahl. In diesem Fall existiert nur ein Brechungsindex  $n_o$ . Im zweiten Prisma gilt für den ordentlichen Strahl unverändert der gleiche Brechungsindex und es erfolgt keine Strahlablenkung. Für den außerordentlichen Strahl hingegen gilt der Brechungsindex  $n_e$ , woraus sich eine Strahlablenkung ergibt, die sich noch einmal beim Strahlaustritt verstärkt.



| Technische Daten – ROCHON-Prismen |                                          |                 |                  |
|-----------------------------------|------------------------------------------|-----------------|------------------|
|                                   | Standardwerte                            |                 |                  |
| Material                          | Kalkspat                                 | Quarz           | MgF <sub>2</sub> |
| Spektralbereich                   | 350 ÷ 2500 nm                            | 200 ÷ 2800 nm   | 140 ÷ 6000 nm    |
| Kontrastverhältnis                | 10 <sup>5</sup>                          | 10 <sup>5</sup> | 10 <sup>5</sup>  |
| Ablenkungswinkel $\alpha$         | 1° - 10°                                 | 0,1° - 1°       | 0,1° - 1°        |
| Maßbereich (Kantenlänge)          | 5 ÷ 15 mm                                | 5 ÷ 25 mm       | 5 ÷ 15 mm        |
| Maßtoleranz                       | ±0,1 mm                                  |                 |                  |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)     | 90 %                                     |                 |                  |
| Parallelität                      | < 5 arcmin                               |                 |                  |
| Planität (633 nm)                 | λ/4 pro Zoll                             |                 |                  |
| Maximale Belastbarkeit            | cw : < 20 W/cm <sup>2</sup>              |                 |                  |
|                                   | Pulse (10 ns) : < 100 MW/cm <sup>2</sup> |                 |                  |
| Fassung                           | Kundenspezifikation                      |                 |                  |

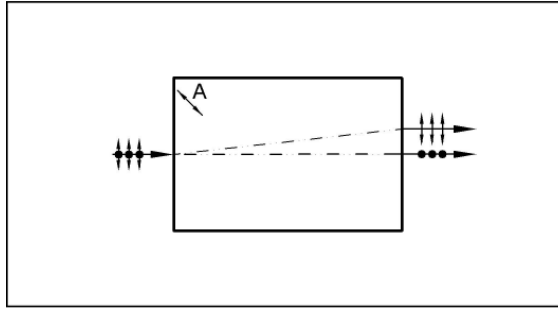
## Strahlversatz-Polarisatoren

Diese Polarisatoren bewirken eine Aufspaltung unpolarisierten Lichtes in zwei senkrecht zueinander linear polarisierte Teilstrahlen, die parallel zueinander und zum Einfallsstrahl verlaufen. Der Abstand der Strahlen ist abhängig von der Wellenlänge und proportional zu der Länge des Polarisators. Die Strahlversatzerzeugung beruht auf der Ablenkung des außerordentlichen Strahls im Kristall, wenn der Winkel zwischen dem Strahl und der optischen Achse ungleich 0° oder 90° ist. Im Fall, der Winkel

beträgt 45°, gilt für die Ablenkung  $\varphi$  des außerordentlichen Strahls :

$$\varphi\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{n_e^2}{n_o^2} \right) [\text{rad}]$$

Der ordentliche Strahl passiert den Polarisator ohne Ablenkung.



| Technische Daten – Strahlversatz-Polarisatoren |                     |               |                  |
|------------------------------------------------|---------------------|---------------|------------------|
|                                                | Standardwerte       |               |                  |
| Material                                       | Kalkspat            | Quarz         | MgF <sub>2</sub> |
| Spektralbereich                                | 300 ÷ 2500 nm       | 200 ÷ 2800 nm | 140 ÷ 6000 nm    |
| Maßbereich (Kantenlänge)                       | 5 ÷ 20 mm           | 5 ÷ 20 mm     | 5 ÷ 20 mm        |
| Strahlversatz                                  | 0,1 mm ÷ 4 mm       | 5 µm ÷ 100 µm | 5 µm ÷ 100 µm    |
| Planität (633 nm)                              | λ/4                 |               |                  |
| Maßtoleranz                                    | ±0,1 mm             |               |                  |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)                  | 90 %                |               |                  |
| Parallelität                                   | ≤ 3 arcsec          |               |                  |
| Fassung                                        | Kundenspezifikation |               |                  |

## 8.4. Verzögerungsplatten

Verzögerungsplatten beruhen ebenfalls auf dem Effekt der Doppelbrechung. Es erfolgt wiederum eine Aufspaltung eingestrahlt Lichtes in zwei Komponenten, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im Kristall fortbewegen, aber keine räumliche Trennung erfahren. Dadurch kann in Abhängigkeit von der Plattendicke eine definierte Phasenverschiebung zwischen den Komponenten realisiert werden.

Die räumliche Verschiebung der beiden Komponenten ordentlicher und außerordentlicher Strahl (die Verzögerung oder Phasenverschiebung) berechnet sich nach :

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) d$$

Für ein bestimmtes Material mit gegebenen Brechungsindizes und einer festgelegten Laserwellenlänge hängt die Verschiebung nur noch von der Dicke der Platte ab.

Wenn die Plattendicke gleich der Phasenverschiebung von λ/4 gewählt wird, erhält man eine zero order λ/4-Verzögerungsplatte :

$$d = \frac{\lambda}{4(n_e - n_o)}$$

Im Fall von λ/2 entsprechend eine zero order λ/2-Verzögerungsplatte :

$$d = \frac{\lambda}{2(n_e - n_o)}$$

Da zero order Verzögerungsplatten fertigungstechnisch schwer zu realisieren sind, werden auch Verzögerungsplatten höherer Ordnung hergestellt, bezeichnet mit multiple order.

Für λ/4 – Platten gilt :

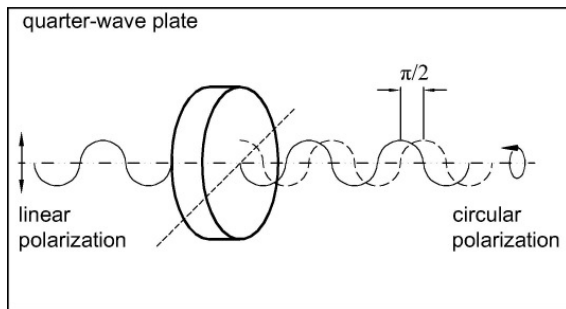
$$d_m = \frac{m\lambda}{n_e - n_o} + \frac{\lambda}{4(n_e - n_o)}$$

Für λ/2 – Platten gilt :

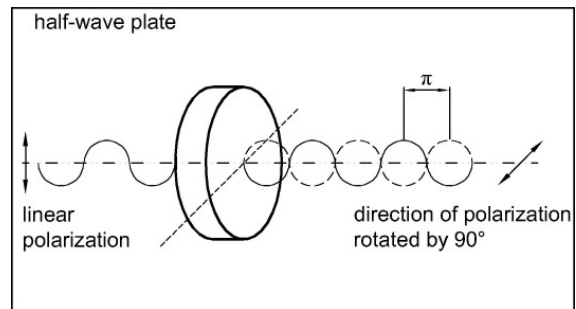
$$d_m = \frac{m\lambda}{n_e - n_o} + \frac{\lambda}{2(n_e - n_o)}$$

Verzögerungsplatten dienen der Änderung und Analyse des Polarisationszustandes des Lichtes. Sie finden insbesondere bei optischen Isolatoren und elektrooptischen Modulatoren Anwendung.

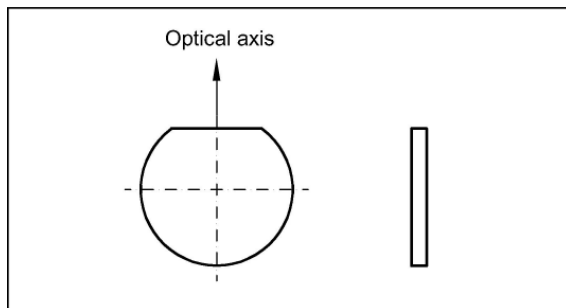
Durch die Materialkombination von SiO<sub>2</sub> und MgF<sub>2</sub> ist es auch möglich **achromatische Verzögerungsplatten** herzustellen.



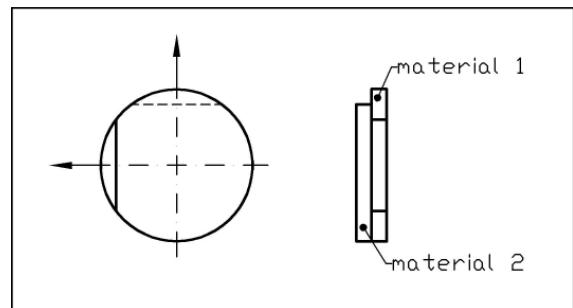
$\lambda/4$  – Verzögerungsplatte



$\lambda/2$  - Verzögerungsplatte



Zero order (0. Ordnung)



Multiple order

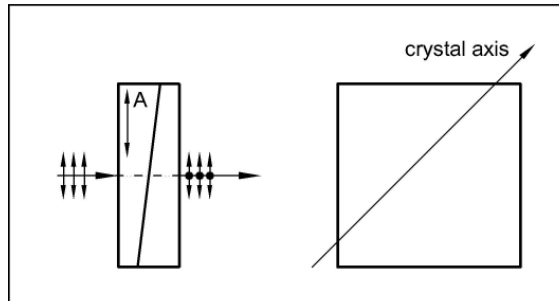
| Technische Daten – Verzögerungsplatten ( $\lambda/2$ und $\lambda/4$ ) |                                          |                                |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
|                                                                        | Standardwerte                            |                                |
| Material                                                               | Quarz                                    | MgF <sub>2</sub>               |
| Spektralbereich                                                        | 200 ÷ 2800 nm                            | 140 ÷ 6000 nm                  |
| Verzögerungstoleranz                                                   | $\lambda/100 \div \lambda/300$           | $\lambda/100 \div \lambda/300$ |
| Maßbereich (Kantenlänge)                                               | 10 ÷ 50 mm                               |                                |
| Maßtoleranz                                                            | ±0,1 mm                                  |                                |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)                                          | 80 %                                     |                                |
| Parallelität                                                           | ≤ 3 arcsec                               |                                |
| Oberflächenqualität (scratch – dig)                                    | 40-20                                    |                                |
| Planität (633 nm)                                                      | $\lambda/4$                              |                                |
| Antireflexionsbeschichtung                                             | Kundenspezifikation (R ≤ 0,20 %)         |                                |
| Maximale Belastbarkeit                                                 | cw : < 20 W/cm <sup>2</sup>              |                                |
|                                                                        | Pulse (10 ns) : < 100 MW/cm <sup>2</sup> |                                |
| Fassung                                                                | Kundenspezifikation                      |                                |



| Technische Daten – Achromatische Verzögerungsplatten ( $\lambda/2$ und $\lambda/4$ ) |                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                                                                      | Standardwerte                            |
| Material                                                                             | Quarz + MgF <sub>2</sub>                 |
| Spektralbereich                                                                      | 460 ÷ 680 nm                             |
| Verzögerungstoleranz                                                                 | $\lambda/50$                             |
| Maßbereich (Kantenlänge)                                                             | 10 ÷ 50 mm                               |
| Maßtoleranz                                                                          | ±0,1 mm                                  |
| Aktive Fläche (Freie Apertur)                                                        | 80 %                                     |
| Parallelität                                                                         | ≤ 3 arcsec                               |
| Oberflächenqualität (scratch – dig)                                                  | 40-20                                    |
| Planität (633 nm)                                                                    | $\lambda/4$                              |
| Antireflexionsbeschichtung                                                           | Kundenspezifikation (R ≤ 0,2 %)          |
| Maximale Belastbarkeit                                                               | cw : < 20 W/cm <sup>2</sup>              |
|                                                                                      | Pulse (10 ns) : < 100 MW/cm <sup>2</sup> |
| Fassung                                                                              | Kundenspezifikation                      |

## 8.5. Keildepolarisatoren

Ein Depolarisator wandelt polarisierte Strahlung in Strahlung mit unpolarisiertem Charakter (pseudorandom) um. Die Depolarisation basiert dabei auf der örtlichen Überlagerung verschieden gedrehter Polarisationszustände. Der Keilpolarisator nach Hanle besteht aus einem Keilpaar. Die erste Komponente ist doppelbrechend. Die schnelle Achse ist in der Regel 45° zu dem Keil orientiert. Die zweite Komponente, der Gegenkeil, korrigiert die Winkelablenkung und wird aus einem Material mit ähnlichem Brechungsindex hergestellt, ist aber nicht doppelbrechend.



| Technische Daten – Keildepolarisatoren |                     |
|----------------------------------------|---------------------|
|                                        | Standardwerte       |
| Spektralbereich                        | 200 ÷ 2800 nm       |
| Maßbereich (Kantenlänge)               | 10 ÷ 50 mm          |
| Parallelität                           | ≤ 5 arcmin          |
| Politurgüte                            | 60-40               |
| Aktive Fläche                          | 90 %                |
| Ebenheit (633 nm)                      | $\lambda/4$         |
| Fassung                                | Kundenspezifikation |