



Verzögerungsplatten

Application Note

Die Auswahl der optimalen Verzögerungsplatte

In vielen optischen Systemen ist es erforderlich, den Polarisationszustand des Lichts zu kontrollieren bzw. einzustellen. Es kann beispielsweise erforderlich sein, die Polarisationsrichtung eines Lichtbündels zu verändern oder auch aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes zu machen oder umgekehrt, oder auch irgendeinen speziellen Polarisationszustand herzustellen.

Für derartige Aufgaben werden – abgesehen von Linearpolarisatoren – **Verzögerungsplatten** verwendet. Mittels einer Verzögerungsplatte wird eine Phasenverschiebung zwischen den beiden orthogonalen Komponenten des elektromagnetischen Feldes erzeugt.

Zunächst ein paar allgemeine Anmerkungen zu diesem Thema. Verzögerungsplatten werden normalerweise aus **doppelbrechenden Materialien** hergestellt, die also **Doppelbrechung** aufweisen: Unterschiedlich polarisierte Lichtstrahlen erfahren unterschiedliche Brechungsindizes. Folglich wird Licht einer Polarisationsrichtung im Vergleich zu Licht der anderen **verzögert** (oder beschleunigt), wenn es eine Platte aus solchem Material durchläuft. Die Größe der **Verzögerung** wird durch die Stärke der Doppelbrechung Δn und die Dicke d der Platte bestimmt.

Die Verzögerung kann in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt/gemessen werden, und unglücklicherweise werden all diese Einheiten in Wissenschaft und Technik auch nebeneinander verwendet:

Verzögerung	Formel
ausgedrückt als Länge (meist nm)	$\Delta d = \Delta n \times d$
ausgedrückt als Bruchteil oder Vielfaches der Wellenlänge	$\Delta\varphi = \frac{\Delta n \times d}{\lambda}$
ausgedrückt als Winkel (rad)	$\Delta\varphi = 2\pi \times \frac{\Delta n \times d}{\lambda}$
ausgedrückt als Winkel (Grad)	$\Delta\varphi = 360^\circ \times \frac{\Delta n \times d}{\lambda}$

In Spezialfällen werden noch weitere Einheiten verwendet, z.B. die Zeit (fs) in ultraschnellen Anwendungen.

Bei den meisten Materialien hängt Δn nur schwach von der Wellenlänge ab. Dann ist $\Delta d = \Delta n \times d$ (beinahe) konstant. Diese Größe ist die optische **Weglängen-Differenz**; üblicherweise wird sie in nm gemessen. In den meisten Anwendungen ist allerdings nicht die Weglängen-Differenz bedeutsam, sondern die **Phasendifferenz $\Delta\varphi$** , ausgedrückt als Bruchteil der Wellenlänge oder als Phasen-

winkel. Beispielsweise ist eine **Lambda/4-Platte** eine Verzögerungsplatte, die eine Verzögerung von $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge oder $\pi/2$ (rad) oder 90° erzeugt; wenn eine Platte eine Verzögerung von einer halben Wellenlänge oder π (rad) oder 180° erzeugt, wird sie als **Lambda/2-Platte** bezeichnet. Diese beiden sind die meistverwendeten Verzögerungsplatten; für andere Verzögerungswerte gibt es keine allgemein übliche Terminologie. Ob eine Verzögerungsplatte aber beispielsweise eine Lambda/4-Platte ist oder nicht, hängt nicht nur von der Platte selbst, sondern offensichtlich auch von der Einsatz-Wellenlänge ab.

Verzögerungsplatten werden aus unterschiedlichen Materialien hergestellt, und es gibt drei Basis-Typen:

- 1. Verzögerungsplatten höherer Ordnung:** Sie erzeugen eine große Phasendifferenz, nämlich ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge plus einen Bruchteil der Wellenlänge, wobei in den meisten Anwendungen nur der Bruchteil eine Rolle spielt.
- 2. Verzögerungsplatten quasi-nullter Ordnung:** Sie bestehen aus einem Paar fast identischer Verzögerungsplatten höherer Ordnung mit orthogonal orientierten Kristallachsen, sodass nur die Differenz der Verzögerungen optisch wirksam ist.
- 3. Verzögerungsplatten echt-nullter Ordnung:** Sie sind extrem dünn und erzeugen eine Phasendifferenz, die tatsächlich nur ein Bruchteil einer Wellenlänge ist.

Bevor man das Material betrachtet, ist zunächst der richtige Typ auszuwählen. Wenn das Lichtbündel

- eine feste Ausbreitungsrichtung hat,
- gut kollimiert ist,
- spektral schmalbandig ist,
- sich in einer temperaturstabilen Umgebung ausbreitet,
- niedrige Intensität hat, räumlich wie auch zeitlich,

dann spielt der Funktionstyp keine große Rolle, und die Auswahl kann überwiegend nach dem Preis und den üblichen optischen Selektionskriterien erfolgen (und natürlich nach Lieferzeit, Zuverlässigkeit etc. – wie alle Einkaufsentscheidungen).

Wenn aber eine der oben genannten Bedingungen nicht erfüllt ist, muss der Funktionstyp sorgfältig ausgewählt werden. In der nachfolgenden Analyse wird der Einfluss dieser Bedingungen auf die Leistung der drei Funktionstypen untersucht. Dazu wird die Präzision der tatsächlichen Verzögerung bei nichtidealen Bedingungen für drei exemplarische Verzögerungsplatten dargestellt:

- 1. Verzögerungsplatte höherer Ordnung:** üblicherweise

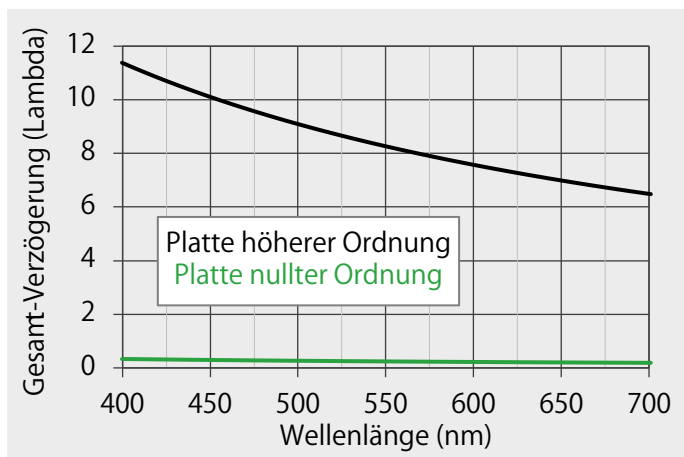
eine einzelne Platte aus Quarzkristall, deren Dicke so gewählt ist, dass sie gut hergestellt und vom Anwender gut gehandhabt werden kann. Viele Hersteller spezifizieren die Dicke ihrer Verzögerungsplatten höherer Ordnung überhaupt nicht, einige spezifizieren ca. 0,5 mm Dicke. Diese Dicke betrachten wir als typisch.

2. Verzögerungsplatte quasi-nullter Ordnung: üblicherweise eine gepaarte Kombination von Quarzplatten (verkittet, optisch kontaktiert oder mit Luftabstand). Die meisten Hersteller spezifizieren die Gesamtdicke nicht, einige spezifizieren 1,5...2,5 mm. Wir betrachten 2 mm als typische Dicke.

3. Verzögerungsplatte echt-nullter Ordnung: Glimmer oder Polymer, unverkittet oder zwischen Glasplatten verkittet, Dicke entsprechend der Nullte-Ordnung-Bedingung.

In unserer Betrachtung konzentrieren wir uns auf den sichtbaren Wellenlängen-Bereich, die Ergebnisse sind aber ohne Weiteres auf das UV und das IR übertragbar. **Wir setzen voraus, dass alle Verzögerungsplatten ein gutes Anti-Reflex-Coating haben;** Verzögerungsplatten ohne AR-Coating können ein recht verwirrendes Verhalten zeigen.

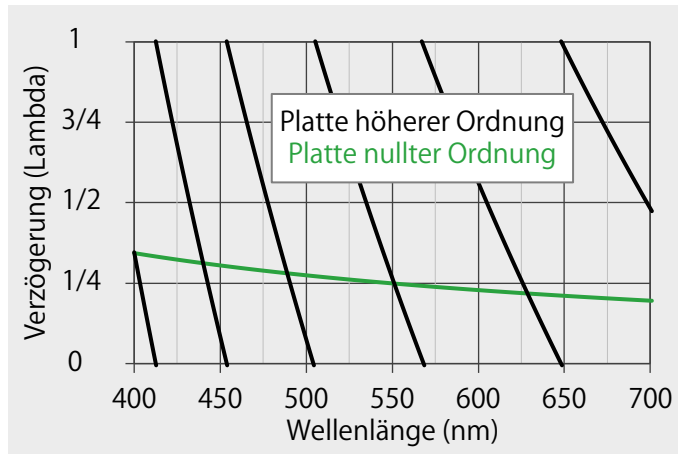
Zunächst vergleichen wir das **spektrale Verhalten** der verschiedenen Platten-Typen, und zwar die Gesamtverzögerung (ohne jegliche „Reduktion auf erste Ordnung“) einer typischen Platte höherer Ordnung aus Quarz mit der einer Platte nullter Ordnung, unter Vernachlässigung jeglicher Dispersion der Doppelbrechung. Als Beispiele nutzen wir Lambda/4-Platten:



Beide Kurven sind Hyperbeln, und die Kurve für die Platte höherer Ordnung ist einfach das 33-fache der Kurve für die Platte nullter Ordnung (8,25 Wellenlängen bei 550 nm gegenüber 0,25 Wellenlängen).

Beim spektralen Verhalten gibt es keinen Unterschied zwischen Platten echt-nullter und quasi-nullter Ordnung. Wie oben erwähnt, spielt für die meisten Anwendungen die auf Null reduzierte Ordnung eine Rolle, also nur der Nach-Komma-Teil der Gesamtverzögerung. Dann sieht der Vergleich so aus:

Die entsprechenden Kurven für andere Design-Verzögerungen sehen sehr ähnlich aus.



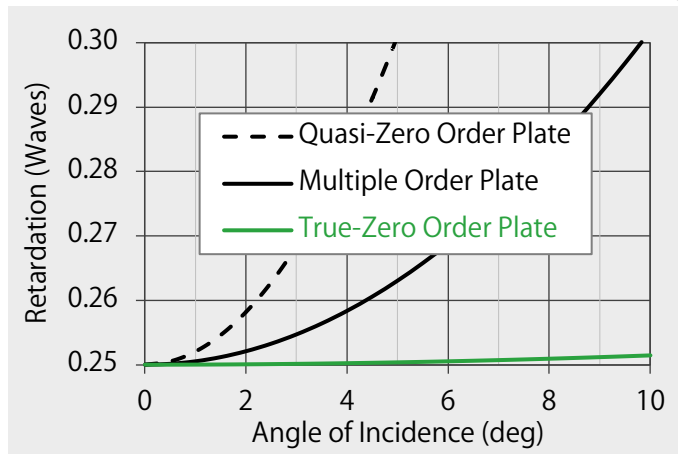
Was können wir aus diesen Diagrammen lernen?

- Verzögerungsplatten nullter Ordnung sind über einen breiten Wellenlängenbereich nutzbar, unabhängig davon, ob sie echt- oder quasi-nullter Ordnung sind.
- Im Gegensatz dazu variiert die Verzögerung von Platten höherer Ordnung (gemessen in Winkleinheiten oder in Einheiten der Wellenlänge) rapide mit der Wellenlänge – so stark, dass sogar der eigentliche Charakter der Platte ($\lambda/4$, $\lambda/2$...) sich schon über kleine Wellenlängenbereiche in sein Gegenteil verkehren kann.

In Bezug auf die Wellenlängen-Abhängigkeit ist jede Platte nullter Ordnung einer Platte höherer Ordnung weit überlegen.

Wir betrachten jetzt die **Winkelabhängigkeit** der Verzögerung der verschiedenen Typen von Verzögerungsplatten, wieder am Beispiel einer Lambda/4-Platte. Während Platten echt-nullter und quasi-nullter Ordnung dieselbe Wellenlängenabhängigkeit aufweisen, ist ihre Winkelabhängigkeit unterschiedlich. Daher müssen wir die Winkelabhängigkeit für alle drei Typen getrennt darstellen:

Tatsächlich hängt die Verzögerung nicht nur vom Einfallswinkel als solchem ab, sondern auch von der Orientierung

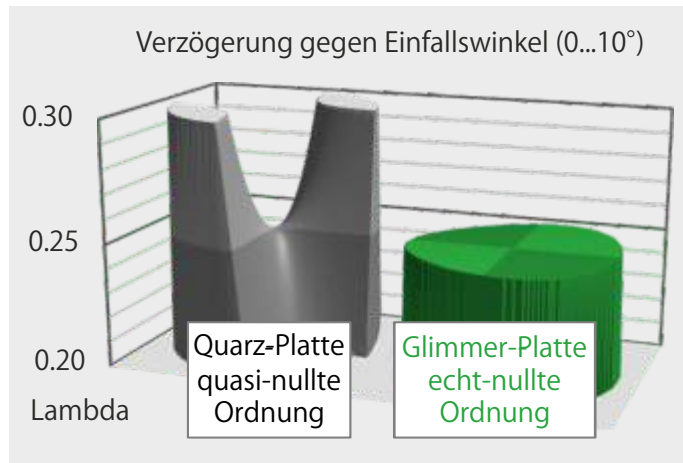


der Einfallsebene in Bezug auf die Kristallachsen. Es gibt zwei orthogonale Orientierungen, bei denen die Verzögerung nicht vom Einfallswinkel abhängt, und zwei andere Orientierungen (um 45° gedreht), wo die Winkel-

abhängigkeit maximal ist; diese letzteren Orientierungen sind für das obige Diagramm herangezogen worden.

Weiterhin kann die Abweichung von der Design-Verzögerung sowohl positiv als auch negativ sein, wiederum abhängig von der Orientierung. Die Verzögerung für alle Orientierungen und Einfallswinkel ist im folgenden Diagramm dargestellt:

Derartige Diagramme sind für unterschiedliche Designs



ähnlich, d.h. es spielt kaum eine Rolle, ob die Platte eine Lambda/4- oder eine Lambda/2-Platte oder irgendeine andere Verzögerungsplatte ist: Die Fehler skalieren proportional.

Zur Winkelabhängigkeit lässt sich somit Folgendes feststellen:

- Bei Verzögerungsplatten, die nicht echt-nullter Ordnung sind, hängt die Verzögerung stark vom Einfallswinkel ab.
- Platten quasi-nullter Ordnung erzeugen sogar den doppelten Fehler der Platten höherer Ordnung, aus denen sie bestehen. Tatsächlich wird schon bei 100 Einfallswinkel aus einer Lambda/4-Platte quasi-nullter Ordnung beinahe eine Lambda/2-Platte; insoweit wird sie völlig unbrauchbar.
- Die Winkelabhängigkeit der Verzögerung ist für Platten echt-nullter Ordnung kaum sichtbar und ist für die meisten realen Anwendungen praktisch vernachlässigbar.

Folglich sollten Platten echt-nullter Ordnung immer dann verwendet werden, wenn die Orientierung des Lichtstrahls in Bezug auf die Verzögerungsplatte nicht völlig kontrolliert werden kann.

Dabei geht es nicht nur um mechanische Instabilitäten oder ähnliche Effekte, sondern auch um Strahl-Kollimation. Wenn der Strahl nicht perfekt kollimiert ist, enthält er alle möglichen Strahlrichtungen – innerhalb seines Divergenz-Kegels. All diese Strahlrichtungen haben unterschiedliche Einfallswinkel auf der Verzögerungsplatte und daraus resultierend unterschiedliche Verzögerungen. Folglich wird ein ursprünglich vollständig

polarisierter divergenter Strahl nach Durchgang durch eine Verzögerungsplatte teilweise depolarisiert, und offensichtlich ist der Depolarisationsgrad nicht einheitlich über das gesamte Feld, sondern abhängig vom Winkel jedes Teilstrahls.

Hier ein numerisches Beispiel für eine realistische Situation: Ein linear polarisiertes Lichtbündel mit einer Divergenz von 100 wird durch eine Lambda/2-Platte quasi-nullter Ordnung transmittiert, die so orientiert ist, dass sie bei senkrechtem Einfall die Polarisationsrichtung um 90° dreht. Durch einen gekreuzten Polarisator tritt dann ca. 27% des einfallenden Lichts anstelle von 0%, und bei einer Verzögerungsplatte höherer Ordnung, die nicht ganz so empfindlich auf die Strahlrichtung reagiert, sind es immerhin noch 9%. Mit anderen Worten: **Ein divergentes Strahlenbündel wird von Verzögerungsplatten, die nicht echt-nullter Ordnung sind, stark depolarisiert.** Im Gegensatz dazu verschwindet die Depolarisation fast vollständig, wenn man eine Platte echt nullter Ordnung verwendet (rechnerisch ergibt sich 0,0015%; das ist nur mit wenigen Polarisatoren überhaupt nachweisbar).

Wir haben also festgestellt, dass bei divergenten Strahlen die Richtungs-Anhängigkeit der Verzögerung eine Depolarisation bewirkt. In gleicher Weise verursacht die Wellenlängen-Abhängigkeit eine Depolarisation nicht-monochromatischer Strahlen. **Folglich sollte – wenn immer möglich – eine Verzögerungsplatte echt-nullter Ordnung verwendet werden.**

Die Verzögerung jedweder Verzögerungsplatte hängt aus zwei Gründen auch von der Temperatur ab:

- Die Plattendicke variiert mit der Temperatur.
- Die Brechungsindizes, und damit die Doppelbrechung, hängen von der Temperatur ab.

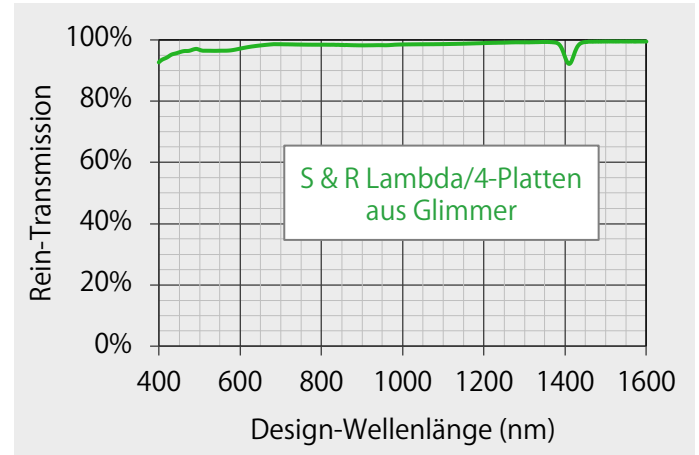
Diese Effekte sind materialspezifisch, bei Quarz und Glimmer ist die Temperaturabhängigkeit aber ähnlich. Für alle Materialien stimmt folgende Aussage: Die Temperaturabhängigkeit von Platten nullter Ordnung ist erheblich geringer als die von Platten höherer Ordnung aus demselben Material. Ein Beispiel für Lambda/4-Platten aus Quarz: Eine Platte höherer Ordnung ist etwa 33-mal so temperaturempfindlich wie eine Platte nullter Ordnung.

Aus all diesen Überlegungen ist folgendes offensichtlich geworden:

- **Eine Verzögerungsplatte höherer Ordnung ist keine gute Wahl, wenn die Wellenlänge variieren kann oder wenn die spektrale Bandbreite nicht sehr klein ist.**
- **Verzögerungsplatten höherer Ordnung wie auch Platten quasi-nullter Ordnung sind keine gute Wahl, wenn die Strahlrichtung variieren kann oder das Strahlenbündel divergent oder konvergent ist.**
- **Eine Verzögerungsplatte echt-nullter Ordnung ist immer eine gute Wahl, selbst unter den Bedingungen, bei denen andere Platten versagen.**

Verzögerungsplatten nullter Ordnung wurden schon frühzeitig aus Glimmer hergestellt, denn Glimmer ist als natürliches Mineral gut verfügbar und war (im 19. Jahrhundert und davor) leichter zu verarbeiten als andere optische Kristalle. Indem man Glimmerplatten einfach längs einer natürlichen Spaltebene spaltet, erhält man Verzögerungsplatten guter Qualität ohne jede Nacharbeit. Im Laufe der Fortentwicklung der optischen Fertigungstechnologie wurde es möglich, Verzögerungsplatten auch aus anderen Kristallen zu vernünftigen Kosten herzustellen. Zusätzlich wurden in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts als Verzögerungselemente geeignete Polymere entwickelt. Parallel dazu geriet Glimmer mehr und mehr ins Hintertreffen. Allerdings haben einige Optik-Unternehmen, wie beispielsweise die S & R Optic GmbH in Heuchelheim bei Gießen, ihre Glimmer-Technologie kontinuierlich weiterentwickelt, wodurch Glimmer auch heute wieder das Material der Wahl für Verzögerungsplatten echt-nullter Ordnung in vielen Anwendungen ist.

Während Glimmer also – verglichen mit den meisten anderen doppelbrechenden Materialien – sehr viele Vorteile hat, hat es auch einen Nachteil: Glimmer weist eine **leichte Absorption** auf. Die Stärke der Absorption wird aber oft überschätzt und kann durch sorgfältige Auswahl des Rohmaterials minimiert werden. S & R Optic verwendet ausschließlich Glimmer mit niedrigster Absorption und stellt folglich Verzögerungsplatten mit sehr hoher Transmission her, hier dargestellt für Lambda/4-Platten:



Das Diagramm zeigt die Reintransmission, also die innere Transmission ohne Berücksichtigung von Reflexionen an den Oberflächen, und zwar nicht für irgendeine bestimmte Plattendicke, sondern direkt für Lambda/4-Platten **bei ihrer jeweiligen Design-Wellenlänge**. Offensichtlich werden diese Transmissionswerte nur mit guten Antireflexions-Schichten auch in der Praxis nutzbar. S & R Optic bietet sogar unverkittete Glimmerplatten („bare mica retardation plates“) mit derartigen AR-Beschichtungen an.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die unter praktischen Gesichtspunkten wichtigen Parameter der unterschiedlichen Verzögerungsplatten-Typen und -Materialien, soweit sie sich wesentlich unterscheiden:

Material	Quarz	Quarz	Quarz	Quarz	Glimmer	Glimmer	Polymer
Funktionstyp	Höhere Ordnung	Quasi-nullte Ordnung	Quasi-nullte Ordnung	Quasi-nullte Ordnung	Echt-nullte Ordnung	Echt-nullte Ordnung	Echt-nullte Ordnung
Aufbau	Einzelplatte unverkittet	Verkittet	Optisch kontaktiert	Mit Luftabstand	Verkittet	Einzelplatte unverkittet	Verkittet
Wellenlängen-Einsatzbereich (nm)	193 – 2000	400 – 2000	193 – 2000	193 – 2000	400 – 1550	350 – 1550	400 - 1550
Max. Durchmesser (prakt.)	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm	200 mm	200 mm	200 mm
Typische Absorption @ 500 nm	vernachlässigbar	minimal	vernachlässigbar	vernachlässigbar	wenige Prozent	wenige Prozent	< 1%
Zerstörschwelle, gepulst @ 1064 nm, 10-20 ns	10 J/cm ²	0,5 J/cm ²	10 J/cm ²	10 J/cm ²	0,5 J/cm ²	10 J/cm ²	4 J/cm ²
Zerstörschwelle, cw @ VIS - NIR	10 MW/cm ²	1,5 kW/cm ²	1 MW/cm ²	1 MW/cm ²	0,5 kW/cm ²	0,5 kW/cm ²	0,5 kW/cm ²
Verzögerungshomogenität über die Apertur (typ. 25 mm)	$\lambda/500$	$\lambda/300$	$\lambda/500$	$\lambda/500$	$\lambda/300$	$\lambda/300$	$\lambda/100$
Verzögerungsgenauigkeit	$\lambda/300$	$\lambda/200$	$\lambda/300$	$\lambda/300$	$\lambda/200$	$\lambda/200$	$\lambda/100$
Temperaturabhängigkeit der Verzögerung je °C	0.3 %	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	0.04 %
Preis (kleine Stückzahl)	hoch	hoch	hoch	sehr hoch	niedrig	mittel	hoch
Preis (mittlere Stückzahl)	niedrig	mittel	mittel	hoch	sehr niedrig	niedrig	mittel
Preis (hohe Stückzahl)	niedrig	mittel	mittel	mittel	sehr niedrig	sehr niedrig	niedrig

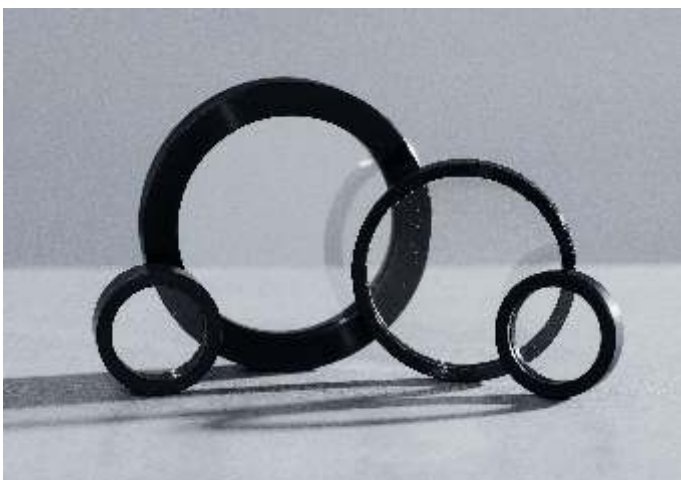
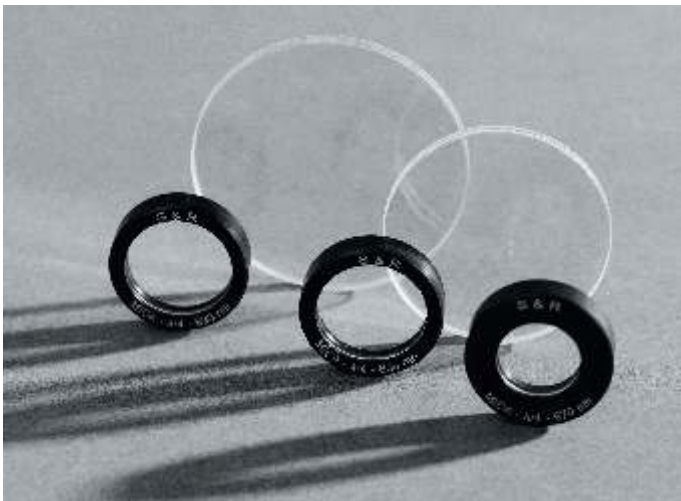
Unverkittete Polymerplatten sind darin nicht enthalten, weil sie wegen ihrer geringen Dicke extrem empfindlich und damit für die Masse aller Anwendungen ungeeignet sind. Die Tabelle zeigt die Vorteile wie auch die Nachteile der jeweiligen Typen und Materialien sehr deutlich. Ein klarer Vorteil von Quarz ist die Verwendbarkeit im UV und auch die sehr hohe Zerstörschwelle, insbesondere für kontinuierliche Strahlung, die das Resultat der extrem niedrigen Absorption von Quarz ist. In anderer Hinsicht ist Quarz aber nicht das optimale Material, insbesondere wegen des relativ hohen Preises – falls die Anwendung nicht doch die Verwendung einer Platte höherer Ordnung erlaubt.

Die Absorption und die damit verbundene relativ niedrige Zerstörschwelle für kontinuierliche Strahlung sind im Wesentlichen die einzigen Nachteile von Glimmer und Polymer gegenüber Quarz. Daher empfiehlt sich immer die Verwendung von Glimmer oder Polymer, falls die konkrete Anwendung nicht eine der positiven Eigenschaften von Quarz erfordert. Und wenn die etwas niedrigere Absorption in Polymer nicht den höheren Preis rechtfertigt: **Verzögerungsplatten echt-nullter Ordnung aus Glimmer sind regelmäßig die beste Wahl**, besonders auch unter Preisgesichtspunkten. Und **für Glimmer gilt neben „niedriger Preis“ im Allgemeinen auch „gute Verfüg-**

barkeit“: Etablierte Hersteller von Glimmer-Verzögerungsplatten wie z.B. S & R Optic GmbH haben üblicherweise einen großen Vorrat an gespaltenen Platten in Nanometer-Abstufung, sodass für die Herstellung einer Platte für fast jede Wellenlänge auf vorgefertigtes Material zurückgegriffen werden kann.

Zusammenfassung:

- Verzögerungsplatten echt-nullter Ordnung sind die beste Wahl unter technischen Gesichtspunkten.
- Verzögerungsplatten quasi-nullter Ordnung haben ein ebenso günstiges Verhalten bei Wellenlängen- und Temperatur-Änderungen, zeigen aber ein noch schlechteres Verhalten gegenüber Strahlrichtungsänderungen als Platten höherer Ordnung.
- Verzögerungsplatten höherer Ordnung sind nur anwendbar, wenn fast alle optischen Parameter und die Betriebstemperatur konstant sind.
- Verkittete Polymer-Verzögerungsplatten sind technisch gesehen eine gute Wahl, sind aber typischerweise sehr kostenintensiv.
- Verzögerungsplatten aus Glimmer sind normalerweise die beste Wahl aus technischer Sicht, und im Allgemeinen sind sie auch besonders gut verfügbar und preisgünstig.



Dr. Wolfgang Schneider Phone: +49 (0) 641-9 60 76 18
 Ludwig-Rinn-Str. 14 Fax: +49 (0) 641-9 60 79 43
 35452 Heuchelheim Email: info@sr-optic.com
 Germany Web: www.sr-optic.com