

Optik – Technische Tipps

Optics – Technical Tutorial



„Wissend ist, wer weiß, wo er findet, was er noch nicht weiß.“

Georg Simmel (1858-1918), dtsh. Soziologe und Philosoph

“Knowing is he who knows where he can find what he does not know yet.”

Georg Simmel (1858-1918), German sociologist and philosopher

Liebe Leser,

unsere Vertriebsgruppen berichten immer wieder, dass unsere Kunden sehr an technischen Tipps interessiert sind. Mit diesem pdf-Katalog haben wir für Sie umfassendes Know-How aus dem Bereich der Laseroptik zusammengefasst. Nutzen Sie den vorliegenden Katalog als Nachschlagewerk. Unsere Produktionstechniker stehen Ihnen darüber hinaus wie gewohnt für eine weiterführende Beratung zur Verfügung.

Das Unternehmen

Produktion und Vertrieb sind die Kernkompetenzen von LASER COMPONENTS. Aktuell werden mehr als 35.000 Komponenten für die Lasertechnik und Optoelektronik angeboten. Etwa die Hälfte der Produkte stammt inzwischen aus unserer Eigenproduktion; weiteren 40 Herstellern bieten wir durch unsere Distribution einen kompetenten Zugang zu internationalen Märkten.

Neben dem Hauptsitz von LASER COMPONENTS in Olching bei München ergänzen mittlerweile sechs Produktionsstätten in drei Ländern und Verkaufsniederlassungen in vier Ländern die global agierende Firmengruppe.

In der Stabilität und Kontinuität gekoppelt mit Dynamik, Flexibilität und flachen Hierarchien liegen die Werte des Familienunternehmens. Zielgerichtete Investitionen in die Entwicklung sind unsere Antwort auf Marktsignale und Kundenwünsche – dies sichert die zukünftige Verfügbarkeit hochwertiger neuer Produkte und Dienstleistungen und damit den weiteren Erfolg unseres Unternehmens.

Optik-Fertigung

Bereits vier Jahre nach der Gründung der LASER COMPONENTS GmbH als Vertriebsunternehmen wurde 1986 der erste Produktionsstandort zur Fertigung von beschichteten Laseroptiken eingeweiht. Nicht zuletzt aufgrund dieser Erfahrung fällt es uns leicht, stets die Maxime unseres Handelns zu erfüllen – die Lieferung höchster Qualität. Die positiven Rückmeldungen unserer Kunden und der jahrelange Verkaufserfolg bestärken uns hierin.

Im Frühjahr 2008 haben wir unsere Produktion erweitert. In Olching werden seitdem auch Linsensubstrate gefertigt, um für Sie kürzeste Lieferzeiten und gleichbleibend hohe Qualität sichern zu können.



Dear Customer,

Our sales groups often encounter customers who are very interested in receiving technical suggestions. Inside this PDF catalog we have compiled comprehensive know-how from the field of laser optics for you. Use this catalog as your reference book. In addition, our product engineers are available for further consultation.

The Company

Production and sales are LASER COMPONENTS' core competencies. We currently distribute more than 35,000 components in laser technology and optoelectronics. Roughly half of these products are now manufactured

in house. With our distributorship we offer qualified access to international markets to more than forty manufacturers.

In addition to its headquarters in Olching, near Munich, the LASER COMPONENTS group also consists of six production sites in three different countries and sales offices in four countries across the globe.

Stability and continuity coupled with drive, flexibility, and flat hierarchies are the values underlying this family-run business. Goal-oriented investments in research and development have been our response to market signals and customer requests: These measures will ensure the availability of new, high quality products and services and with it the continuing success of our company.

Optics Production

Just four years following the founding of LASER COMPONENTS GmbH as a distributor, the first production site was opened for the manufacture of coated laser optics in 1986. This experience has always made it easy for us to fulfill the maxim behind our trade: delivery of the highest quality. The positive feedback from our customers and long lasting sales success have encouraged us in this endeavor.

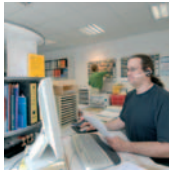
In the spring of 2008 we expanded production to include lens substrates. Manufacturing substrates in Olching gives us the ability to ensure the shortest delivery times at a consistently high quality.

Günther Paul
President

Patrick Paul
General Manager

Inhaltsverzeichnis

Table of Contents



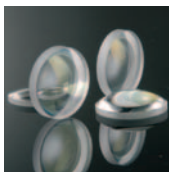
Grundlagen der Optik Basic Principles of Optics

7



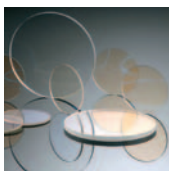
Auswahl der optimalen Linse Selecting the Optimal Lens

15



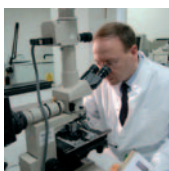
Optimale Materialauswahl Selection of Optimal Material

21



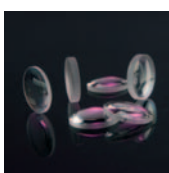
Wissenswertes über Beschichtungen Valuable Information on Coatings

31



Spezifikation bei LASER COMPONENTS Specification at LASER COMPONENTS

41



Reinigen von Laseroptiken Cleaning Laser Optics

57

Grundlagen der Optik

7

Abbildungs-Nomenklatur	8
Vorzeichenkonventionen	8
Formelsammlung zur Linsenberechnung	9
Bestimmung der spärischen Aberration	10

Basic Principles of Optics

7

Diagram Nomenclature	8
Sign Conventions	8
Collection of Formulas for Lens Calculatin	9
Determination of the Spherical Aberration	10

Auswahl der optimalen Linse

15

Einzellinsen	16
Linsen-Systeme	19
Abbildungsfehler	20

Selecting the Optimal Lens

15

Singlet Lenses	16
Lens Systems	19
Aberrations	20

Optimale Materialauswahl

21

Material-Übersicht	22
Transmissionskurven	24
Brechungsindex	28

Selection of Optimal Material

21

Material Overview	22
Transmission Curves	24
Refractive Index	28

Wissenswertes über Beschichtungen

31

Definition der Polarisationsrichtung	32
Spiegeleinsatz bei verschiedenen Winkeln	33
Typ. Bandbreiten bei dielektr. Beschichtungen	34
Regel für Kurzpass- und Langpass-Spiegel	36
Kombination von Beschichtungen	36
Zerstörschwellenmessung	37

Valuable Information on Coatings

31

Polarization Direction for a Laser Beam	32
Mirrors at Different Angles	33
Typical Bandwidths of Dielectric Coatings	34
Rules for Short-pass and Long-pass Mirrors	36
Combination of Coatings	36
Damage Threshold Measurement	37

Spezifikation bei LASER COMPONENTS 41

Materialauswahl	42
Blasen- und Schlierenklassen	43
Passfehler	46
Zentriergenauigkeit	49
Oberflächenfehler	50
Oberflächengüte	51
Kennzeichnung von Beschichtungen	53
Praktisches Beispiel	53

Specification at LASER COMPONENTS 41

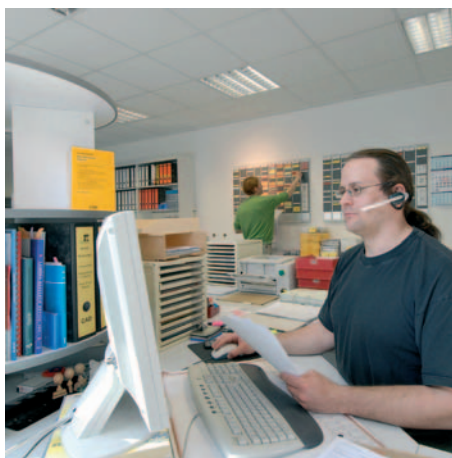
Choice of Material	42
Classifications of Bubbles and Striae	43
Surface Figure Error	46
Centering Accuracy	49
Surface Quality	50
Surface Finish	51
Labelling of Coatings	53
Concrete Example	53

Reinigen von Laseroptiken 57

Tipps zur Reinigung	58
Reinigungsanleitung	59

Cleaning Laser Optics 57

Tips on Cleaning	58
Cleaning Instructions	59



Abbildungs-Nomenklatur	8	Diagram Nomenclature	8
Vorzeichenkonventionen	8	Sign Conventions	8
Formelsammlung zur Linsenberechnung	9	Collection of Formulas for Lens Calculatin	9
Bestimmung der spärischen Aberration	10	Determination of the Spherical Aberration	10

Grundlagen der Optik

Abbildungsm-Nomenklatur

Zur Definition von Bezeichnungen und Größen bei Einzellinsen wird die nebenstehende Zeichnung verwendet.

Die optische Achse (OO') der Linse entspricht der Linie, welche die Krümmungsmittelpunkte der beiden sphärischen Linsenoberflächen schneidet. Die Krümmungsmittelpunkte sind hier nicht eingezeichnet.

Strahl A verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse und wird in F_2 gebrochen. F_2 wird als hinterer, sekundärer oder Bild-Brennpunkt bezeichnet.

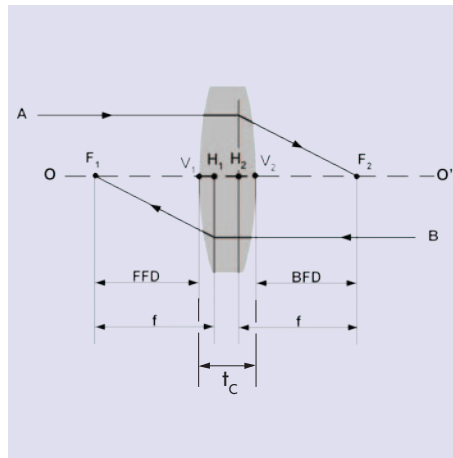
Strahl B verläuft ebenfalls parallel zur optischen Achse jedoch in anderer Richtung. Er wird in dem Punkt F_1 gebrochen, dem so genannten vorderen, primären oder Objekt-Brennpunkt.

Bei „gut korrigierten“ Linsen werden alle parallel zur optischen Achse verlaufenden Strahlen in einem Brennpunkt fokussiert.

Linsen, deren Dicke nicht vernachlässigt werden darf, können als optisches System angesehen werden, welches sich aus mehreren Linsen zusammensetzt. Die Brennpunkte F_1 und F_2 werden von den äußeren Scheitelpunkten V_1 und V_2 aus gemessen – deren Abstände FFD/BFD vordere bzw. hintere Brennweite genannt.

Die Schnittpunkte der verlängerten einfallenden und austretenden Strahlen ergeben eine gekrümmte Fläche. Im achsennahen Gebiet lässt sich diese Fläche durch eine Ebene nähern, die Hauptebene genannt wird. Als vorderer H_1 bzw. hinterer H_2 Hauptpunkt werden die Punkte bezeichnet, an denen die Hauptebene die optische Achse schneidet. Von den Hauptpunkten aus ergeben sich die effektiven Brennweiten f als Abstand zwischen F_1 und H_1 bzw. F_2 und H_2 .

Der Abstand der Hauptebenen liegt für gewöhnliche Glaslinsen bei etwa einem Drittel der Linsendicke $V_1V_2 = t_c$.



The adjoining drawing is used to define terms and quantities of singlet lenses.

The optical axis (OO') of the lens is the line passing through the centers of curvature of the two spherical lens surfaces. The centers of curvature are not shown in the diagram.

Ray A runs parallel to the optical axis and is refracted to point F_2 . F_2 is called the back, secondary, or image focal point.

Ray B also runs parallel to the optical axis but in the opposite direction. It is refracted to point F_1 , the so-called front, primary, or object focal point.

"Well corrected" lenses focus all rays parallel to the optical axis to a single focal point.

Lenses in which the thickness cannot be neglected can be viewed as optical systems consisting of multiple lenses. The focal points F_1 and F_2 are measured from the vertices V_1 and V_2 . The distances FFD and BFD are called front and back focal distance, respectively.

The intersecting points of the extended progenitor and refracted rays form a sphere. For the area close to the optical axis this sphere can be approximated by a plane, which is known as principal surface. The intersections H_1 and H_2 of the principal surface with the optical axis are called the front and back principal point, respectively. The distances from the principal points to their respective focal points (H_1F_1 and H_2F_2) are represented by f , the effective focal length.

For common glass lenses the distance between the principal planes is approximately one third of the lens thickness $V_1V_2 = t_c$.

Vorzeichenkonventionen

Um die beschriebenen Größen zu berechnen, werden Vorzeichenkonventionen benötigt, die wie folgt lauten:

- Abstände nehmen nach rechts hin zu.
- Eine Oberfläche hat eine positive Krümmung, wenn ihr Krümmungsmittelpunkt rechts von ihrem Scheitelpunkt liegt.
- Winkel vergrößern sich gegen den Uhrzeigersinn von Null (d. h. parallel zur optischen Achse) auf positive Werte.
- V_1H_1 und H_2V_2 sind positiv, wenn die Hauptpunkte jeweils rechts bzw. links von ihren dazugehörigen Scheitelpunkten liegen. Hauptpunkte können außerhalb der Linse liegen.

Sign Conventions

To calculate the described dimensions we need the following sign conventions:

- Distance increases towards the right.
- A surface has positive curvature if its center of curvature is to the right of the vertex of the surface.
- Angles increase from zero, parallel to the optical axis, to positive values in a counter-clockwise direction from the optical axis.
- V_1H_1 and H_2V_2 are positive if the principal points are to the right and left, respectively, of their corresponding vertices. Note that the principal points can fall outside of the lens.

Formelsammlung zur Linsenberechnung

Zur Berechnung der verschiedenen Spezifikationen dienen folgende Formeln. Dabei bezeichnet R_1 den eingangsseitigen Krümmungsradius, R_2 den ausgangsseitigen Krümmungsradius der Linse.

Allgemeine Formeln für Linsen in Luft-Umgebung
General Formulas for Lenses Immersed in Air

Symbol	Description	Formula
f	Effektive Brennweite Effective focal length	$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] + \frac{t_c (n-1)^2}{nR_1R_2}$
BFD	Hintere Brennweite Back focal length	$BFD = f \left[1 - \frac{t_c (n-1)}{nR_1} \right]$
FFD	Vordere Brennweite Front focal distance	$FFD = f \left[1 + \frac{t_c (n-1)}{nR_2} \right]$
H_2V_2 V_1H_1	Abstand Hauptpunkt - Scheitelpunkt Distance principal point - vertex	$H_2V_2 = f - BFD = f \frac{t_c (n-1)}{nR_1}$ $V_1H_1 = f - FFD = -f \frac{t_c (n-1)}{nR_2}$

Spezialfälle der Brennweiten von dünnen Linsen in Luft-Umgebung
Selected Cases of the Focal Distances for Thin Lenses Immersed in Air

Type	Description	Formula
Plankonvex Plano-convex		$f = \frac{R}{(n-1)}$
Plankonkav Plano-concave		$f = -\frac{R}{(n-1)}$
Bikonvex Biconvex		$f = \left[\frac{2(n-1)}{R} - \frac{t_c (n-1)^2}{nR^2} \right]^{-1}$
Bikonkav Biconcave		$f = -\left[\frac{2(n-1)}{R} + \frac{t_c (n-1)^2}{nR^2} \right]^{-1}$

In der Übersicht zu Einzellinsen in unserem [Laseroptik-Katalog](#) sind die Brennweiten für die wichtigsten Wellenlängen angegeben. Weiterhin sind die genauen Krümmungsradien und Angaben zur Mittendicke zu finden. Mit den gelisteten Formeln können Sie weitere Brennweiten berechnen. Angaben zu den Brechungsindizes der einzelnen Substrate finden Sie ab Seite 28 in den Brechungsindextabellen.

Collection of Formulas for Lens Calculation

The following formulas are used to calculate the different specifications. R_1 denotes the radius of curvature of the incident side, R_2 the radius of curvature of the output side.

In the singlet overview of our laser [optics catalog](#), you will find focal length values for the most important wavelengths. The exact radii of curvature and center thickness values are also stated. You can use the listed formulas to calculate additional focal lengths. Specifications regarding the refraction indices of the different substrates can be found from page 28 on in the refraction index tables.

Bestimmung der sphärischen Aberration

Hochwertige Einzellinsen sind für das Fokussieren von Lasern und für Anwendungen zur Strahlführung von besonderem Interesse. Sie sind kostengünstig, besitzen eine hohe Zerstörschwelle und sind als Standardbauteile in großer Vielfalt verfügbar.

LASER COMPONENTS bietet eine umfassende Auswahl an BK7 und „UV grade“ Quarz Einzellinsen an, welche den meisten Ansprüchen beim Einsatz von monochromatischem Licht genügen.

Sphärische Flächen liefern lediglich im Gaußschen Gebiet ideale Abbildungen. Es sollte daher per Simulation untersucht werden, wie hoch die Abweichungen außerhalb des Gebietes sind, um die Einsatzmöglichkeiten zu bestimmen.

Simulation

Die Simulation stellt eine geometrische Strahlenverfolgung von 25 Strahlen in der Brennebene einer plankonvexen BK7 Linse mit einer Brennweite von 100 mm dar ($n = 1.515$).

Ein kollimierter Laserstrahl trifft auf die konvexe Seite der Linse und tritt über die plane Seite aus. Die simulierten Strahlen werden parallel zur optischen Achse in gleichen Abständen über einen Bereich von 16 mm ober- und unterhalb der Achse verteilt.

Der Ursprung des abgebildeten Graphen (0 mm) fällt mit dem hinteren Scheitelpunkt V_2 der Linse zusammen. Auf der x-Achse wird damit die hintere Brennweite **BFD** dargestellt.

Simulationsergebnis

- Die achsenfernen Strahlen schneiden die optische Achse in der Ebene MP während die paraxialen in der Fokusebene PP auftreffen.
- Der Abstand von V_2 PP entspricht dem hinteren Fokusabstand (**BFD**) der Linse.
- Der Abstand PPMP (hier negativ) wird als longitudinale sphärische Aberration **LAm** der achsenfernen Strahlen bezeichnet.
- Die Strahlbreite in der paraxialen Fokusebene PP ist die transversale sphärische Aberration **TSAm**, welche durch die Höhe der achsenfernen Strahlen und damit durch den Eingangsstrahldurchmesser bestimmt wird.

Beachten Sie, dass sich die kleinste geometrische Spotgröße in der Ebene **MS** befindet. Diese liegt, bezogen auf die Strecke MPPP, etwa 3/4 vor der PP-Ebene.

Determination of the Spherical Aberration

High quality singlet lenses are of particular interest in laser focusing and beam handling applications because of their low cost, high damage threshold, and availability of a large variety of standard parts.

LASER COMPONENTS offers a large selection of BK7 and UV grade quartz singlets that can satisfy most monochromatic application requirements.

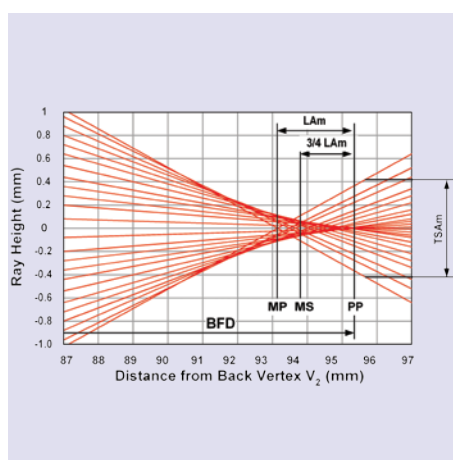
Only in the Gaussian area do spherical surfaces deliver ideal images. It is therefore recommendable to simulate how high the deviations outside the area are in order to determine possible applications.

Simulation

This simulation is a geometrical ray trace of 25 rays in the focal region of a 100 mm focal length BK7 plano-convex lens ($n = 1.515$).

A collimated laser beam enters the convex side of the lens and exits on the plane side. The simulated rays are launched parallel to the optical axis and are equally spaced in a region 16 mm above and below the axis.

The origin of the graph (0 mm) is at the back vertex (V_2) of the lens. The x-axis hence shows the back focal distance (**BFD**).



Simulation Result

- The marginal rays intersect the optical axis in plane MP while the paraxial rays reach the axis at focal plane PP.
- The distance V_2 PP is the back focal distance (**BFD**) of the lens.
- The distance PPMP, here negative, is the longitudinal spherical aberration **LAm** of the marginal rays.
- The beam width in the paraxial focal plane PP is the transverse spherical aberration **TSAm**, determined by the height of the marginal rays (and hence by the diameter of the incident beam).

Notice that the smallest geometrical spot size can be found at plane **MS**, approximately 3/4 LAm back toward the lens from the paraxial focal plane PP.

Formfaktor

Bei Einzellinsen kann der kleinste Strahldurchmesser d_{MS} in der Ebene MS mittels der Aberrationstheorie dritter Ordnung berechnet werden. Das Ergebnis hierzu lautet:

$$d_{MS} = f \Delta\theta_{blur}$$

wobei $\Delta\theta_{blur}$ die „Vollwinkel-Winkelunschärfe“ der Linse für einen kollimierten Eingangsstrahl ist. Sie ist gegeben durch:

$$\Delta\theta_{blur} = (d_0/f)^3 [n^2 - (2n+1)K + (n+2)K^2/n] / 32(n-1)^2$$

mit d_0 : Durchmesser des Eingangsstrahls
 K: Formfaktor der Linse, gegeben durch:
 $K = R_2 / (R_2 - R_1)$

Beachten Sie, dass die Orientierung der Linse in K enthalten ist.

Winkelunschärfe

Dargestellt ist unter Bedingung der geometrischen Optik die Winkelunschärfe als Funktion des Formfaktors einer sphärischen Einzellinse für typische Brechungsindizes:

- Quarz ($n = 1.4942$ bei 280.0 nm)
- BK7 ($n = 1.5205$ bei 514.5 nm)
- SF11 ($n = 1.7648$ bei 800.0 nm)

Shape Factor

For singlet lenses, the smallest beam diameter d_{MS} at plane MS can be computed from the third order aberration theory. The result is:

$$d_{MS} = f \Delta\theta_{blur}$$

where $\Delta\theta_{blur}$ is the “full angle angular blur” of the lens for collimated input light, given by:

$$\Delta\theta_{blur} = (d_0/f)^3 [n^2 - (2n+1)K + (n+2)K^2/n] / 32(n-1)^2$$

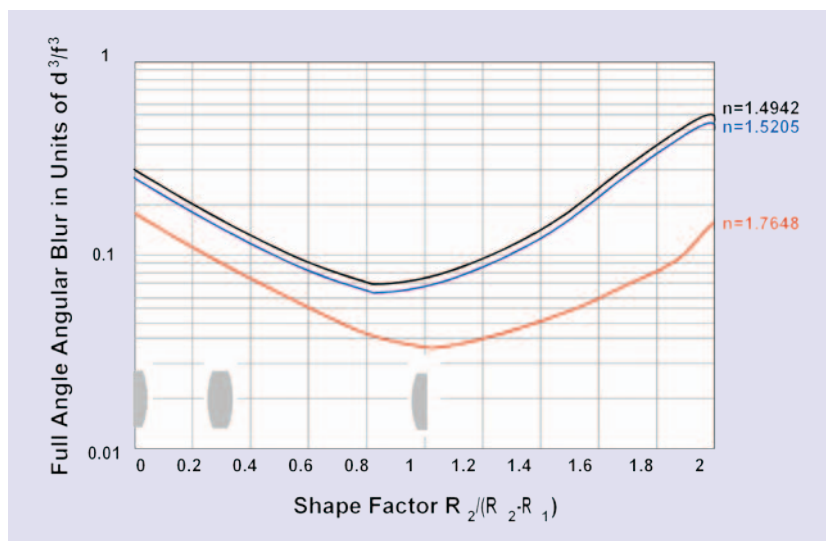
where d_0 : Input beam diameter
 K: Shape factor of the lens given by:
 $K = R_2 / (R_2 - R_1)$

Note that the lens orientation is contained in K.

Angular Blur

Assuming geometrical optics conditions, the graph depicts the angular blur as a function of the shape factor of a spherical singlet lens for typical refractive indices:

- Quartz ($n = 1.4942$ at 280.0 nm)
- BK7 ($n = 1.5205$ at 514.5 nm)
- SF11 ($n = 1.7648$ at 800.0 nm)



Bestimmung der Einflussnahme der sphärischen Aberration

Es wird angenommen, dass ein kollimierter Strahl auf die Linsenfläche mit dem Radius R_1 trifft. Um das Diagramm benutzen zu können, berechnen Sie den Formfaktor K der Linse unter Anwendung der korrekten Vorzeichenkonventionen für R_1 und R_2 . Lesen Sie die Winkelunschärfe aus obigen Graphen ab, wobei d der Strahldurchmesser und f die Fokallänge ist. Berechnen Sie nun die eigentliche Winkelunschärfe in Radianten durch Multiplikation mit $(d_0/f)^3$. Zum Schluss multiplizieren Sie mit der Brennweite, um die Spotgröße in Längeneinheiten zu erhalten. Liegt dieser Wert deutlich unter der Beugungsbegrenzung, wird die Performance der Linse durch Beugung und nicht durch sphärische Aberration limitiert sein.

Determination of the Influence of the Spherical Aberration

A collimated beam is assumed incident on the lens surface with radius R_1 . To use this graph, find the shape factor of the lens using the proper sign conventions for R_1 and R_2 . Read the angular blur, in units where d is the beam diameter and f is the focal length. Then calculate the actual angular blur in radians by multiplying by $(d_0/f)^3$. Finally, multiply by the focal length to obtain the spot size in units of length. If the value is much less than the diffraction limit, performance of the lens will be limited by diffraction rather than spherical aberration.

Zu beachten:

- Der kollimierte Laserstrahl sollte zuerst auf die gekrümmten Fläche auftreffen. Eine verkehrt im Strahlengang ausgerichtete Plankonvexlinse vervierfacht die Unschärfe.
- Die Verwendung einer Best-Form-Linse rechtfertigt kaum ihren hohen Preis.
- Der hohe Index ($n = 1.799$ bei 515 nm) von SF11 reduziert die Aberration einer Einzellinse deutlich.

Beispielhafte Berechnung

Bei $K = 1$ soll die minimale Strahlgröße $d_{MS} = 226 \text{ }\mu\text{m}$ einer geometrischen Optik berechnet werden.

LAm ist gegeben durch: $LAm = -4f \Delta\theta_{blur} / d_0$

Die minimale Spotgröße tritt in einer Entfernung von $s_2 = BFD - 0.75 \text{ LAm}$ vom hinteren Scheitelpunkt der Linse auf. In diesem Beispiel seien $LAm = -2.82 \text{ mm}$ und $s_2 = 93.92 \text{ mm}$.

Ein Spot mit einem Durchmesser von $226 \text{ }\mu\text{m}$, welcher durch Fokussieren eines kollimierten Strahls mit 32 mm Durchmesser erzielt wird, besitzt eine starke Aberration.

Die beugungsbegrenzte Vollwinkel-Winkelunschärfe mit einer Apertur, die durch den Strahldurchmesser d_0 begrenzt ist, berechnet sich aus:

$$\Delta\theta_{diff} = 2.44 \lambda / d_0$$

Dies impliziert eine beugungsbegrenzte Spotgröße von:

$$d_{diff} = f \Delta\theta_{diff} = 2.44 \lambda f / d_0$$

d_{diff} entspricht dem Durchmesser des ersten dunklen Rings des Airy-Musters in der Brennebene. Im obigen Beispiel beträgt $d_{diff} = 4.8 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Wellenlänge von 632.8 nm .

Die Beugungsbegrenzung ist eine Funktion von der Brennweite f und dem Strahldurchmesser. Die dargestellte Kurve errechnet sich für

$$f \Delta\theta_{blur} = f \Delta\theta_{diff}$$

Es gilt:

- $f \Delta\theta_{blur} > f \Delta\theta_{diff}$ Spotgröße durch Aberration limitiert
- $f \Delta\theta_{blur} < f \Delta\theta_{diff}$ Spotgröße ist beugungsbegrenzt

Die Kurven auf der folgenden Seite stellen diese Berechnung für korrekt orientierte plankonvexe Einzellinsen aus BK7 und Quarzglas dar.

Important to Note:

- The collimated laser beam should first hit the curved surface. The error of misorienting a plano-convex lens approximately quadruples the blur.
- Use of a best form lens is hardly worth the expense.
- The high index of SF11 ($n = 1.799$ at 515 nm) significantly reduces singlet aberration.

Calculation Example

For $K = 1$ we can compute the geometrical optics minimum beam size of $d_{MS} = 226 \text{ }\mu\text{m}$.

LAm is given by: $LAm = -4f \Delta\theta_{blur} / d_0$

The minimum spot size occurs at a distance of $s_2 = BFD - 0.75 \text{ LAm}$ from the rear vertex of the lens. In this example, $LAm = -2.82 \text{ mm}$ and $s_2 = 93.92 \text{ mm}$.

A $226 \text{ }\mu\text{m}$ spot size obtained by focusing a 32 mm diameter collimated beam possesses a strong aberration.

The diffraction limited full angle angular blur with aperture limited by the beam diameter d_0 is:

$$\Delta\theta_{diff} = 2.44 \lambda / d_0$$

Implying a diffraction limited spot size of:

$$d_{diff} = f \Delta\theta_{diff} = 2.44 \lambda f / d_0$$

d_{diff} is the diameter of the first dark ring of the Airy pattern in the focal plane. For the above example, $d_{diff} = 4.8 \text{ }\mu\text{m}$ at a wavelength of 632.8 nm .

The diffraction limit is a function of focal distance f and the beam diameter. The depicted graph is computed by

$$f \Delta\theta_{blur} = f \Delta\theta_{diff}$$

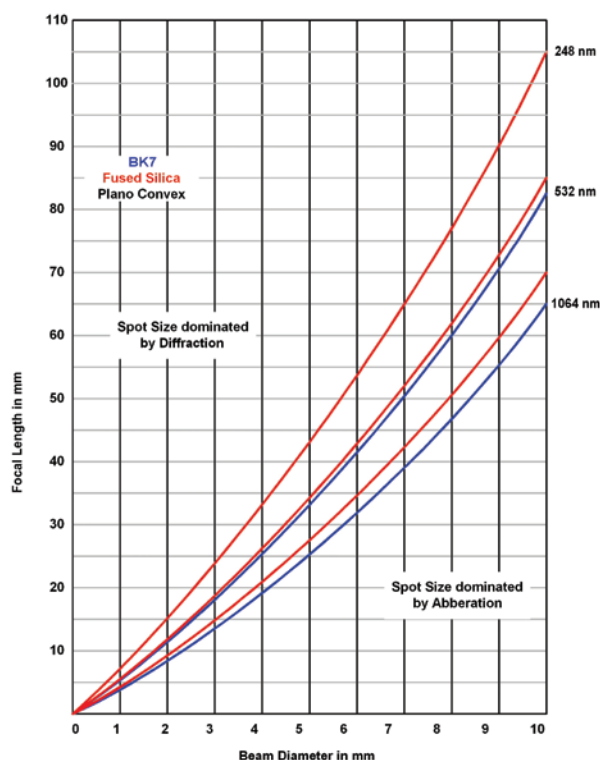
where if:

- $f \Delta\theta_{blur} > f \Delta\theta_{diff}$ the spot size is limited by aberration
- $f \Delta\theta_{blur} < f \Delta\theta_{diff}$ the spot size is essentially diffraction limited

The curves on the following page depict this computation for properly oriented plano-convex BK7 and quartz singlets.

Beugungsbegrenzung

Zur Benutzung der Kurven suchen Sie zunächst den Schnittpunkt von Strahldurchmesser und gewünschter Fokusslänge im Diagramm. Liegt dieser Punkt oberhalb der Kurve der gewünschten Wellenlänge, ist das Verhalten einer plankonvexen Einzellinse im Prinzip beugungsbegrenzt. Liegt der Punkt auf oder unterhalb der Kurve, ziehen Sie die Verwendung einer Doppellinse zur Verringerung der verzerrten Spotgröße in Betracht.



Hinweise

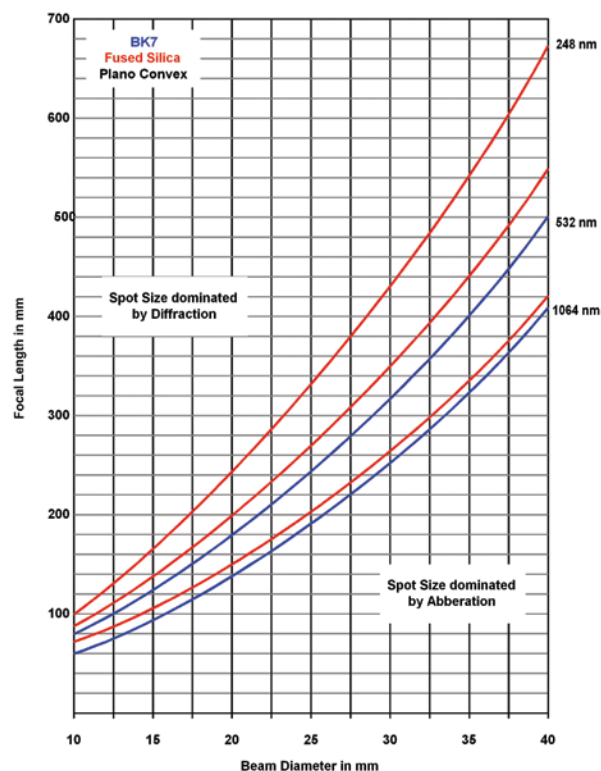
Zum Entwurf von optischen Systemen mit geringer Divergenz des Laserstrahls ist die paraxiale Näherung geeignet, um die Elemente optimal zu positionieren. Aufgrund von Beugungserscheinungen können Berechnungen der Vergrößerung gänzlich abweichen, wurden sie basierend auf der geometrischen Optik berechnet.

Beachten Sie folgende Vorgehensweise:

- Verwenden Sie den bekannten ABCD Matrixformalismus.
- Behandeln Sie die Linsen wie dünne Linsen.
- Benutzen Sie die Entfernungen zwischen den Hauptpunkten, um die Position der Elemente zu bestimmen.
- Verwenden Sie in einer komplexeren Rechnung die tatsächlichen Krümmungsradien, Brechungsindizes und Mittendicken, so berücksichtigt Ihre Rechnung bereits die Hauptebenen.

Diffraction Limit

To use the curves, find the beam diameter and desired focal length point on the graph. If this point is above the curve for the intended wavelength, plano-convex singlet lens performance is essentially diffraction limited. If this point is on or below the curve, consider using a doublet to decrease the aberrated spot size.



Note

In designing optical systems for low divergence laser beams, the paraxial approximation is excellent as far as the positioning of the elements is concerned. However, due to diffraction, the magnifications encountered may be completely different than those calculated from geometrical optics.

Note the following method:

- Use the familiar ABCD matrix formalism.
- Treat the lenses as thin lenses.
- Use the distances between the principal points to determine the element positioning.
- If you use the actual radii of curvature, refraction indices, and center thicknesses in a more detailed calculation, your calculation will already implicitly take into account the principal planes.

Auswahl der optimalen Linse

Selecting the Optimal Lens



Einzellinsen
Linsen-Systeme
Abbildungsfehler

16
19
20

Singlet Lenses
Lens Systems
Aberrations

16
19
20

Auswahl der optimalen Linse

Oft steht der Anwender vor der Frage, welche Linse für seine Abbildung am Besten geeignet ist. Im Folgenden sind gängige Linsentypen dargestellt und die gebräuchlichsten Anwendungen beschrieben.

Sammel- und Zerstreuungslinsen

Generell wird zwischen positiven, d.h. bündelnden Sammel-linsen und negativen, d.h. streuenden Linsen unterschieden. Linsen mit konvexen Flächen sind Positivlinsen; die Brennweite der Linse wird mit positiven Vorzeichen beschrieben. Linsen mit konkaven Flächen sind Negativlinsen; diese Linsen haben eine negative Brennweite. Die Meniskus-Linse tritt sowohl als Positiv- als auch als Negativlinse auf.

Einzellinsen

Plankonvex- und Plankonkav-Linsen

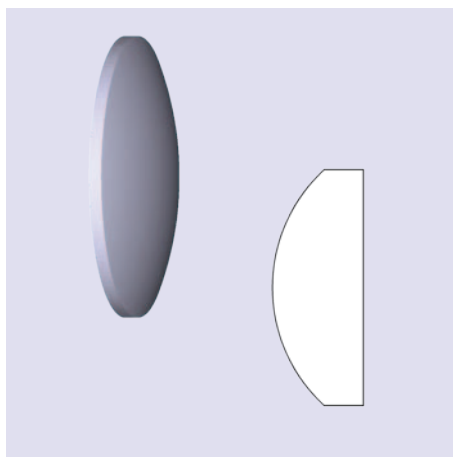
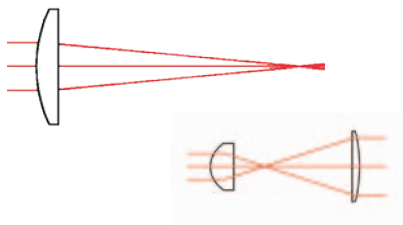
Plankonvex- bzw. Plankonkav-Linsen haben, verglichen zu Lin-sen mit zwei gekrümmten Flächen, den Vorteil der einfacheren Fertigung und damit des günstigeren Stückpreises. Außerdem sind sie sehr gut geeignet zur Fokussierung, bzw. Kollimierung von Laserstrahlen. Die sphärischen Aberrationen der Plan-konvex- bzw. Plankonkav-Linsen werden reduziert, indem die gekrümmte Linsenfläche zum kollimierten Strahl zeigt.

Plankonvex-Linse

Hauptanwendung

- Fokussierung von kollimierten Laserstrahlen
- Strahlaufweitung und Kollimation
- Abbildung bei langen Brennweiten

Anwendungsbeispiel

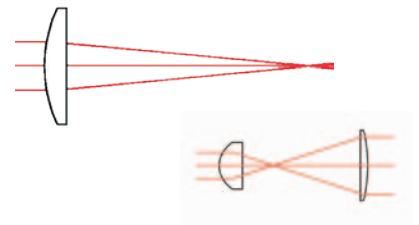


Plano-convex Lens

Main application

- Focussing of collimated laser beams
- Beam expansion and collimation
- Imaging over long focal distances

Application example



Selecting the Optimal Lens

Oftentimes a user is faced with the question of which lens is best suited for his image. In the following, standard lens types are introduced and their most common applications described.

Converging and Dispersing Lenses

In general, there are positive (i.e. converging) lenses and negative (i.e. dispersing) lenses. Lenses with convex surfaces are positive lenses: the focal distance of the lens is described with a positive sign. Lenses with concave surfaces are negative lenses: these lenses have a negative focal distance. The meniscus lens can be both a positive lens and a negative lens.

Singlet Lenses

Plano-convex and Plano-concave Lenses

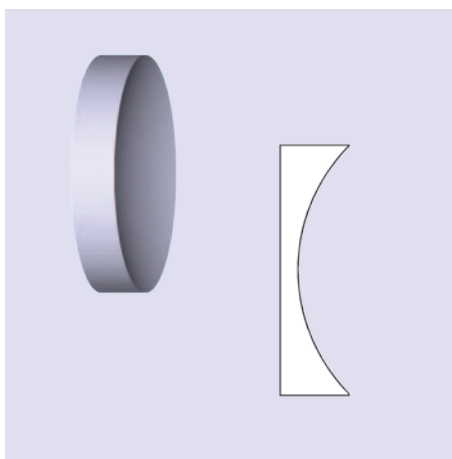
Compared to lenses with two curved surfaces, plano-convex and plano-concave lenses have the advantage of being easier to manufacture and therefore cheaper. In addition, they are particularly well suited for focussing and collimating laser beams. The spherical aberrations of plano-convex and plano-concave lenses are reduced by letting the curved side of the lens face the collimated beam.

Plankonkav-Linse

Hauptanwendung

- Strahlaufweitung
 - Galilei Prinzip bei hohen Leistungen
 - Kein Zwischenfokus wie beim Einsatz von zwei plankonvexen Linsen
 - Kürzere Baulänge als bei der Keppler Aufweitung

Anwendungsbeispiel



Plano-concave Lens

Main application

- Beam expansion
 - Galileo's principle at high power levels
 - No intermediate focus like in the application of two plano-convex lenses
 - Shorter assembly length than in the Keppler expansion

Application example



Bikonvex- und Bikonkav-Linsen

Bikonvexe Linsen werden bevorzugt verwendet, wenn nahezu 1:1 Abbildungen durchgeführt werden sollen. Auch werden bikonvexe und bikonkave Linsen gern eingesetzt, wenn sehr kurze Brennweiten notwendig sind. Aufgrund der beiden gekrümmten Oberflächen wird eine kürzere Fokusslänge bei größeren Radien möglich. Sehr stark gekrümmte Flächen sind kostenintensiv in der Herstellung, da nur wenige Linsen gleichzeitig poliert werden können.

Biconvex and Biconcave Lenses

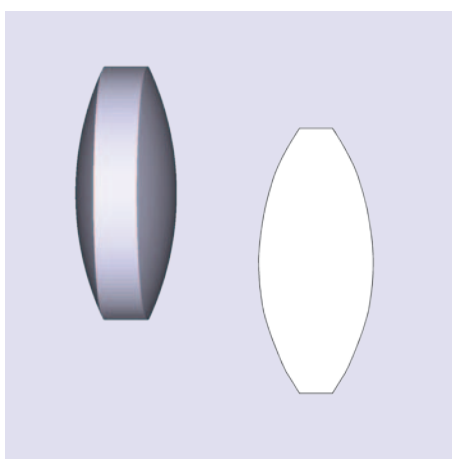
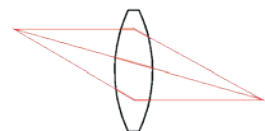
Biconvex lenses are preferred when close to 1:1 images are required. Biconvex and biconcave lenses are also used if very short focal distances are needed. Because both surfaces are curved, a shorter focus length with larger radii is possible. Very heavily curved surfaces are expensive to manufacture because only a few lenses can be polished at the same time.

Bikonvex-Linse

Hauptanwendung

- Fokussierung bei sehr kurzen Brennweiten
- Strahlaufweitung für $F_2/F_1 = 0.2 \dots 5$
- 1:1 Abbildung, da hierbei die sphärische Aberration gering ist

Anwendungsbeispiel

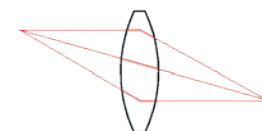


Biconvex Lens

Main application

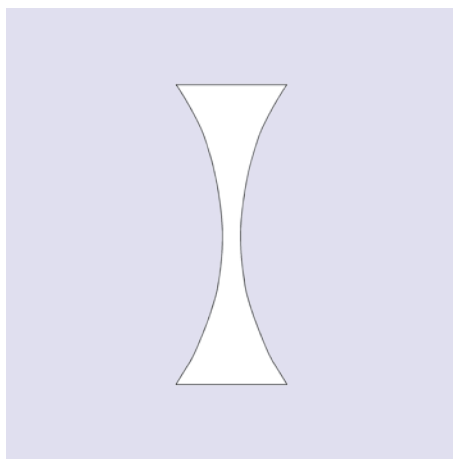
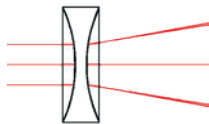
- Focussing over very short focal distances
- Beam expansion for $F_2/F_1 = 0.2 \dots 5$
- 1:1 image because the spherical aberration in this case is low.

Application example

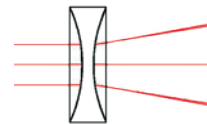


Bikonkav-Linse**Hauptanwendung**

- Einsatz, wenn sehr kurze negative Fokallängen benötigt werden und eine Plankonkavlinse einen zu starken Krümmungsradius haben würde.

Anwendungsbeispiel**Biconcave Lens****Main application**

- Used if very short negative focus lengths are required and a plano-concave lens would require a radius of curvature that is too large.

Application example**Bestform-Linse**

Die Bestform-Linse ist eine Einzellinse, bei der die sphärisch gekrümmten Flächen so optimiert werden, dass für eine Einzellinse die minimale sphärische Aberration entsteht.

Hauptanwendung

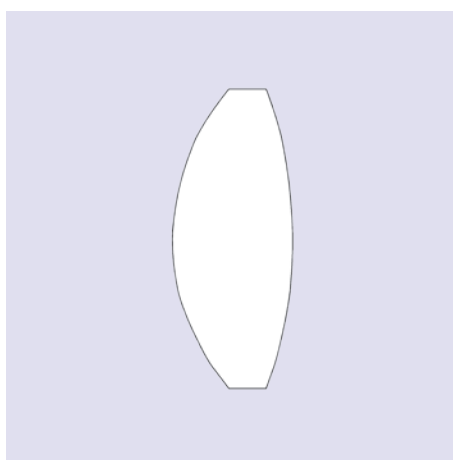
- Einsatz bei hohen Anforderungen an das Spotbild

Bemerkungen

Die Radien rcx_1 und rcx_2 sind abhängig von der Brennweite und dem Brechungsindex des Glases.

Beispiel für $n \approx 1.5$:

- $f = 125 \text{ mm}$,
 $rcx_1 = 73.7 \text{ mm}$, $rcx_2 = 492.0 \text{ mm}$
- $f = 25 \text{ mm}$,
 $rcx_1 = 14.4 \text{ mm}$, $rcx_2 = 96.0 \text{ mm}$

**Best Form Lens**

Best form lenses are singlet lenses in which the spherically curved surfaces are optimized to exhibit the least spherical aberration possible for a singlet lens.

Main application

- Application with high demands of the spot image

Remarks

The radii R_1 and R_2 depend on the focal distance and the refractive index of the glass.

Example for $n \approx 1.5$:

- $f = 125 \text{ mm}$,
 $rcx_1 = 73.7 \text{ mm}$, $rcx_2 = 492.0 \text{ mm}$
- $f = 25 \text{ mm}$,
 $rcx_1 = 14.4 \text{ mm}$, $rcx_2 = 96.0 \text{ mm}$

Asphärische Linse**Eigenschaften**

Einsatz, wenn keine sphärische Aberration auftreten darf. Die Linsen haben eine weniger starke Krümmung in den Randbereichen, wodurch auch die achsenfernen Strahlen im Brennpunkt auftreten. Die Optimierung dieser Linsen erfolgt durch Optik-Design Simulationsprogramme.

Bemerkungen

Aufgrund des aufwändigen Fertigungsprozesses sind die asphärischen Linsen sehr kostenintensiv.

**Aspherical Lens****Features**

Aspherical lenses are used if spherical aberrations must be avoided. These lenses have a smaller curvature at the edges, causing even marginal rays to intersect at the focal point. Optimization of these lenses is done through the use of optic design simulation programs.

Remarks

As a result of the complex manufacturing process, aspherical lenses are very expensive.

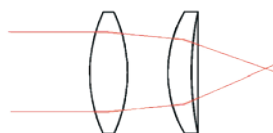
Meniskus-Linse

Meniskus-Linsen sind Linsen, mit einer konkaven und konvexen Krümmung. Sie werden in Linsensystemen zur Korrektur von sphärischen Aberrationen und Astigmatismus verwendet.

Hauptanwendung

- Linsensysteme
Einsatz, wenn die geringste sphärische Aberration gefordert wird
- Bei kurzen Brennweiten kann als Abschlusslinse des Systems eine Meniskus-Linse statt eines Linsensystems eingesetzt werden. Hierdurch verringert sich die sphärische Aberration.

Anwendungsbeispiel

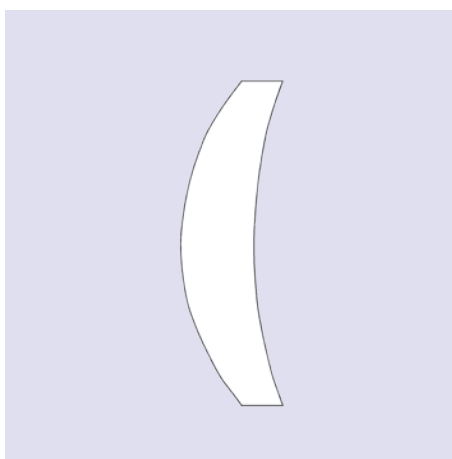
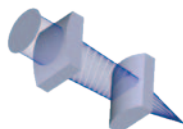


Zylinder-Linse

Hauptanwendung

- Kollimation von asymmetrischen Strahlengängen
- Linienfokussierung
- Korrektur des Astigmatismus

Anwendungsbeispiel



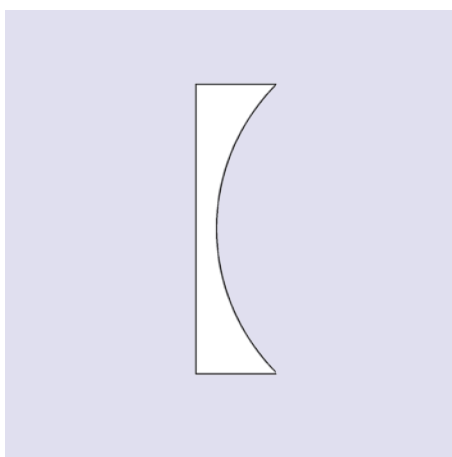
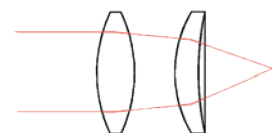
Meniscus Lens

Meniscus lenses are lenses with a concave and convex curvature. They are used in lens systems to correct spherical aberrations and astigmatism.

Main application

- Lens systems
This lens is used if the lowest spherical aberration is required.
- For short focal distances a meniscus lens can be used instead of a lens system as an end lens. With this meniscus lens, the spherical aberration is reduced.

Application example

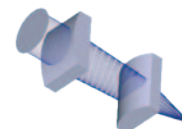


Cylindrical Lens

Main application

- Collimation of asymmetrical beam paths
- Line focussing
- Astigmatism correction

Application example



Linsen-Systeme

Ist die Abbildungsqualität einer „einfachen“ Linse nicht ausreichend, so können verschiedene Standard-Linsen-Systeme eingesetzt werden, die häufig für einen Test von Prototypen oder Aufbauten im Labor ausreichen. Folgende bestehende Systeme sind in der Lasertechnik von Bedeutung:

- Aplanate, Triplets
(Verminderung der sphärischen Aberration)
- Zoomobjektive
- Telezentrische Objektive
(konstanter Abbildungsmaßstab z. B. für Objekterkennung)
- F-Theta Objektive (Scan-Objektive)
- Strahlaufweitungen
- Kollimatorobjektive

Lens Systems

If the imaging quality of a "simple" lens is inadequate, different standard lens systems can be used that have often proven adequate in the laboratory during the testing of prototypes or assemblies. The following existing systems are of importance in laser technology:

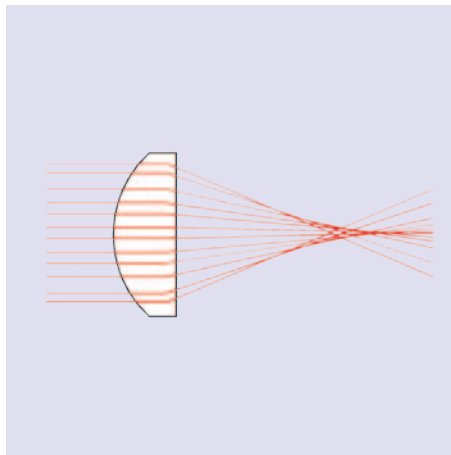
- Aplanatic lenses, triplets
(Reduction of spherical aberrations)
- Zoom objectives
- Telecentric objectives
(constant imaging scale, e.g. for object recognition)
- F-Theta objectives (Scanning objectives)
- Beam expanders
- Collimator objectives

Abbildungsfehler

Die unterschiedlichen Linsen werden für verschiedene Einsatzgebiete verwendet. Die Entscheidung für ein Linsensystem hängt von den zu vermeidenden Abbildungsfehlern ab. Die folgenden Abbildungsfehler spielen in der Laseroptik eine Rolle.

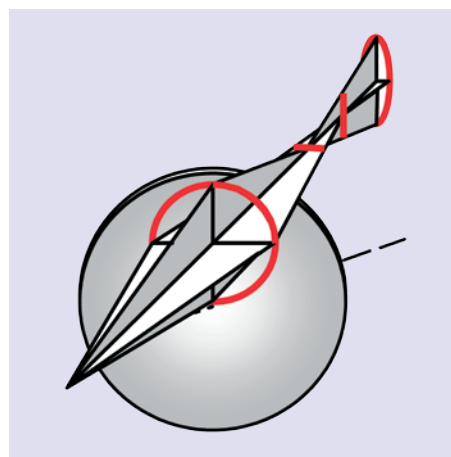
Sphärische Aberration/Öffnungsfehler

Die sphärische Aberration, auch als Öffnungsfehler bekannt, ergibt sich bei weit geöffneten Strahlen, welche symmetrisch zur optischen Achse verlaufen. Eine optimale Fokussierung in einem Punkt erfolgt lediglich für paraxiale Strahlen. Strahlen, die weiter von der optischen Achse entfernt sind, werden kürzer gebrochen, d. h. der Brennpunkt von Randstrahlen liegt vor dem Brennpunkt von Mitstrahlen. Dies wird als sphärische Aberration bezeichnet. Diese nimmt bei kürzeren Brennweiten und größerem Strahldurchmesser zu.



Astigmatismus

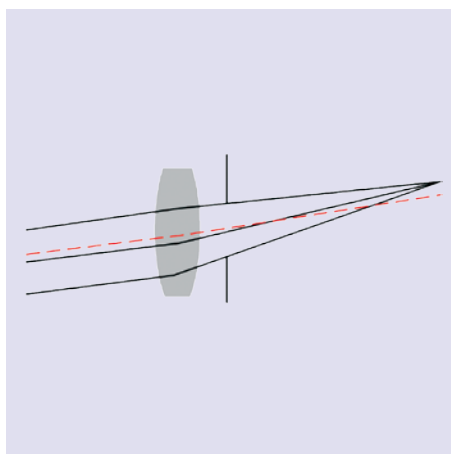
Astigmatismus tritt z. B. durch eine Strahllenkung eines konvergierenden Strahls auf; d. h. die Eingangsstrahlen verlaufen unsymmetrisch zur optischen Achse der Linse. Teilt man das Strahlenbündel in zwei Ebenen auf (Meridian- und Sagittal-Schnitt), so erhält man unterschiedliche Brennweiten für Strahlen dieser beiden Ebenen. Ein Punkt wird nicht mehr als Punkt, sondern in Form zweier Bildlinien abgebildet. Astigmatismus kann durch Meniskus- und Zylinderlinsen korrigiert werden.



Koma/Unsymmetrischer Öffnungsfehler

Der Koma-Fehler entsteht, wenn der kollimierte Strahl schräg zur optischen Achse verläuft. Der Strahlengang verläuft sehr unsymmetrisch durch die Linse und ist als starke Verzeichnung (Tropfen- oder Kometenform) in der Bildebene zu erkennen.

Der unsymmetrische Öffnungsfehler kann durch die Auswahl einer geeigneten Blende verringert werden. Die Blende muss so positioniert werden, dass nur symmetrische Strahlenteile durchgelassen werden.



Aberrations

Different lenses are used for different application fields. The decision as to which lens system to use depends on the aberrations that should be avoided. The following aberrations play a defining role in laser optics.

Spherical Aberrations

Spherical aberrations are caused by wide open beams that run symmetrically to the optical axis. An optimal focusing in a single point only occurs for paraxial beams. Beams that are farther from the optical axis are refracted at a shorter distance, i.e. the focal point of edge beams comes before the focal point of central beams. This is known as a spherical aberration. It grows with shorter focal distances and larger beam diameter.

Astigmatism

An astigmatism occurs, for instance, during the deflection of a converging beam, i.e. the incident beams run asymmetrically to the optical axis of the lens. If the beam is split into two planes (meridian and sagittal plane), the rays of each plane will have different focal distances. A dot no longer appears as a dot, but rather in the form of two lines. An astigmatism can be corrected by both meniscus and cylindrical lenses.

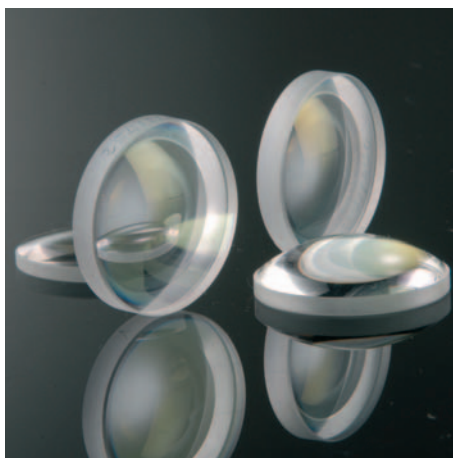
Coma

The coma error occurs when the collimated beam runs at an angle to the optical axis. The beam path runs pretty asymmetrically through the lens and causes heavy distortions (teardrop or comet shaped) in the imaging plane.

The coma error can be reduced by selecting a suitable aperture. The aperture has to be positioned to only allow symmetrical beam parts to pass through.

Optimale Materialauswahl

Selection of Optimal Material



Material-Übersicht
Transmissionskurven
Brechungsindex

22
24
28

Material Overview
Transmission Curves
Refractive Index

22
24
28

Optimale Materialauswahl

LASER COMPONENTS bietet eine Vielzahl von Laseroptik-Substraten an. Diese unterscheiden sich nicht nur in der Form sondern vor allem in der Materialart. Nicht jedes Material eignet sich für jede Anwendung. Es ist daher notwendig, die Eigenschaften der Materialien zu kennen, um eine passende Auswahl zu treffen.

Für die optimale Performance einer Laseroptik sollten zudem Beschichtung und Substrat aufeinander abgestimmt sein. Hier sind vor allem die optischen aber auch mechanischen Eigenschaften des Substrates zu berücksichtigen. Bei den optischen Eigenschaften liegt das Hauptaugenmerk auf dem Brechungsindex und darauf, in welchem Spektralbereich das Material transmittiert. Zusätzlich sind weitere Faktoren, wie Härte des Materials, thermische Ausdehnung, Temperaturbeständigkeit und Laserfestigkeit von Bedeutung.

Material-Übersicht*

Für Anwendungen im sichtbaren und nahen IR-Bereich hat sich BK7 als Standardglas etabliert. Beim Einsatz im UV-Bereich und bei sehr hohen Leistungsdichten hat sich synthetisches Quarzglas wie Suprasil®, Lithosil® Q1, C7980 und JGS1 durchgesetzt.

Weitere gängige Materialien sind Infrasil® und Suprasil® 300 für den IR-Bereich bis ca. 3500 nm sowie Saphir, welches sich vor allem durch seine Härte und die weite Transparenz von 250 nm bis 5000 nm auszeichnet. Für Anwendungen, bei denen geringste thermische Ausdehnungen von hoher Bedeutung sind, können Glaskeramiken wie Zerodur® eingesetzt werden.

Für die Anwendung in der Laseroptik sind vor allem das Transmissionsverhalten und die Brechzahl des Substrates von Interesse. Die nachfolgende Übersicht zeigt die typischen Transmissionsbereiche für gängige Materialien.

*) Verweis auf Markeninhaberschaft siehe Impressum.

Selection of Optimal Material



LASER COMPONENTS has a variety of laser optic substrates available. These substrates differ not only in form but also in the type of material. Not all materials are suited for every application. It is therefore necessary to be familiar with the properties of each material in order to find a fitting selection.

For optimal performance of a laser optic, the coating and substrate should also fit together. Not only the optical but also mechanical features of these substrates should be taken into consideration. The main focus of optical features is on the refractive index and on the spectral range in which the material transmits. Additional factors such as the hardness of a material, the thermal expansion, temperature stability, and laser resistance are also of importance.



Material Overview*

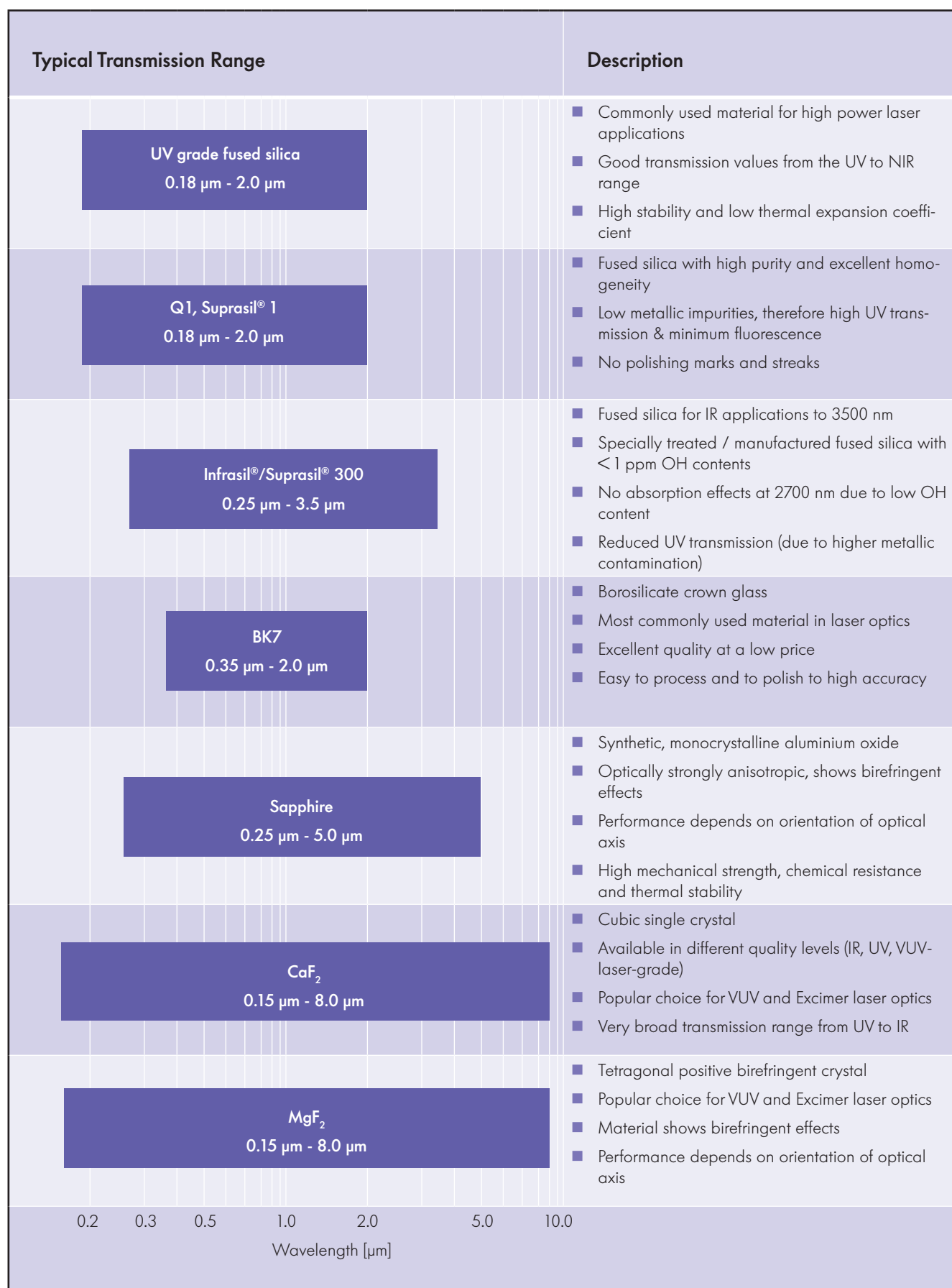
For applications in the visible and near IR ranges, BK7 have established themselves as standard glass. When used in the UV range and for very high power densities, synthetic quartz glass such as Suprasil®, Q1, C7980, and JGS1 have become standard.

Other common materials include Infrasil® and Suprasil® 300 for the IR range to approximately 3500 nm as well as sapphire, which excels in particular because of its hardness and a wide transparency from 250 nm to 5000 nm. For applications in which the lowest thermal expansion is of great importance, glass ceramics such as Zerodur® can be used.

The transmission ratio and refractive index of substrates are of particular interest in laser optics. The following overview lists the transmission range of common materials.

*) For a reference to the trademark ownership see imprint.





Transmissionskurven

Nachfolgend stellen wir Ihnen die Transmissionskurven für die gebräuchlichsten Materialien vor. Für die Anwendung in der Laseroptik ist neben dem Transmissionsverhalten die erreichbare Politurgüte von Interesse.

Selbstverständlich können Sie auch weitere Transmissionskurven der verschiedenen Glashersteller erhalten.

Sprachgebrauch

Bei der Nennung von BK7 handelt es sich immer um N-BK7 oder H-K9L. Falls von Quarzglas gesprochen wird, kann es sich um Materialien wie Lithosil® Q0/Q1/Q2, Suprasil®, C7980 oder JGS1 handeln. Sofern Sie für Ihre Anwendung ausschließlich ein bestimmtes Material zulassen, so bitten wir um einen entsprechenden Hinweis.

Synthetischer Quarz – UV bis NIR

Lithosil® Q0/Q1/Q2; Suprasil® 1, 2, 311, 312; HPFS® C7980; JGS1

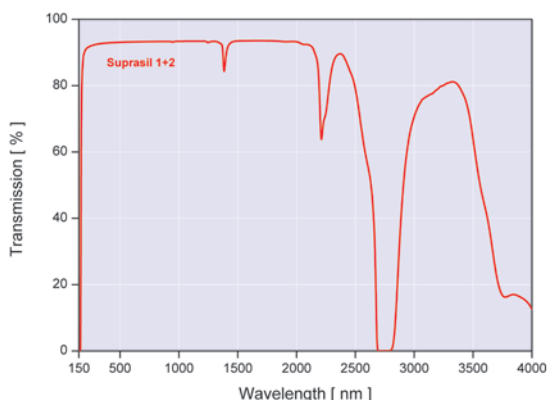
Als synthetischer Quarz werden jegliche synthetische, amorphe Formen von Siliziumoxid bezeichnet, welche auf Basis von Siliziumtetrachlorid durch Flammenhydrolyse hergestellt werden. Quarzglas wird häufig eingesetzt und zeichnet sich durch gute Transmissionswerte vom UV- bis in den NIR-Bereich aus.

Bei den Quarzgläsern werden viele Arten von unterschiedlichen Herstellern angeboten, die sich geringfügig in den Transmissionseigenschaften und in weiteren Parametern unterscheiden. Im Folgenden eine beispielhafte Auswahl.

Für Laseranwendungen sind die Quarzsorten Lithosil® Q0/Q1, Suprasil® 1 und 2, HPFS® Corning Code 7980 und JGS1 (China) vergleichbar. Bei LASER COMPONENTS werden als Standardmaterialien hauptsächlich Lithosil® Q1, C7980 und JGS1 verwendet.

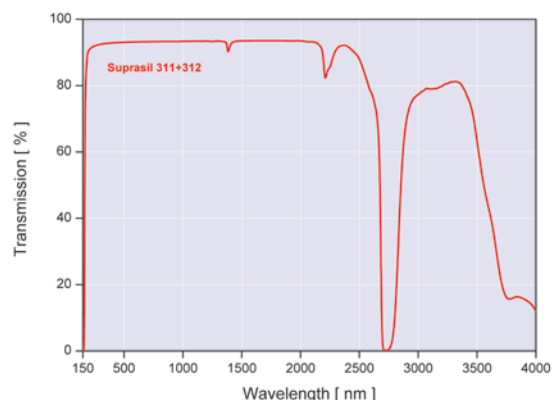
Die Typen Spectrosil® A und B und die Glassorten 1100 und 4100 von Dynasil kommen den oben genannten Quarzsorten sehr nahe.

Suprasil® 1 + 2



Typical transmission of Suprasil® 1 and 2 including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Suprasil® 311 + 312



Typical transmission of Suprasil® 311 and 312 including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Transmission Curves

In the following, we will introduce the transmission curves of the most commonly used materials. Not only is the transmission ratio of particular interest in laser optics, but the achievable polishing quality as well.

We can certainly request additional transmission curves from various glass manufacturers for you.

Nomenclature

The mentioning of BK7 always refers to N-BK7 or H-K9L. Fused silica generally refers to materials like Lithosil® Q0/Q1/Q2, Suprasil®, C7980, or JGS1. Simply let us know if you only allow certain materials to be used in your application.

Synthetic Quartz – UV to NIR

Lithosil® Q0/Q1/Q2; Suprasil® 1, 2, 311, 312; HPFS® C7980; JGS1

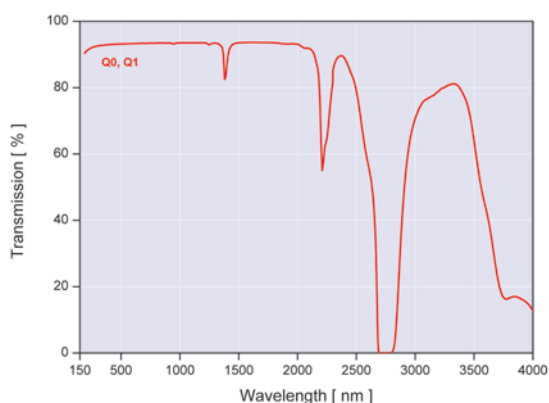
Any synthetic, amorphous form of silicon oxide that is manufactured from a silicon tetrachloride base via flame hydrolysis is called synthetic quartz. Quartz glass is commonly used and exhibits good transmission values from the UV to NIR range.

Many kinds of quartz glass that narrowly differ in transmission values and other parameters are available from various manufacturers. Examples include:

For applications in the UV range, the quartz brands Lithosil® Q0/Q1, Suprasil® 1 and 2, HPFS® Corning Code 7980 and JGS1 are comparable. LASER COMPONENTS primarily uses Lithosil® Q1, C7980, and JGS1 as standard material.

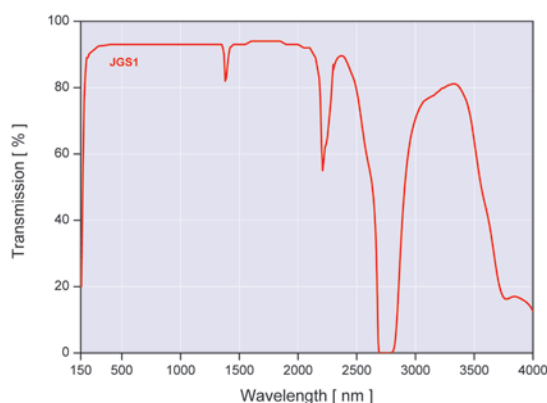
The brands Spectrosil® A and B and the glass types 1100 and 4100 from Dynasil come very close to the aforementioned quartz brands.

Schott Lithosil® Q0/Q1



Typical transmission of Lithosil® Q0/Q1 including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Fused Silica JGS1



Typical transmission of JGS1 including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Eigenschaften

Einige Gläser, wie bspw. Lithosil® Q0 und Suprasil® I, sind homogen, schichtfrei und weisen in alle drei Raumrichtungen die gleiche Brechzahl auf (optische isotrope Medien). Diese Typen eignen sich besonders für Anwendungen in mehrdimensionalen Optiken.

Alle genannten Gläser eignen sich für herkömmliche Laseranwendungen. Selbstverständlich können Sie bestimmte Materialien bei der Bestellung vorgeben, sollten diese Einfluss auf Ihre Anwendung haben. Beachten Sie jedoch, dass sich die Lieferzeit hierdurch verlängern kann.

Features

Some glasses, for example Lithosil® Q0, are homogenous and display the same refractive index in all three spatial directions. This model is particularly well suited for applications in multi-dimensional optics.

All aforementioned glasses are suited for conventional laser applications. When placing an order, you can, of course, request certain materials if they will influence your application. However, please be aware that this may increase the delivery time.

Synthetischer Quarz – IR

Infrasil®, Suprasil® 300

Für Anwendungen im IR-Bereich bis etwa 3000 nm und zur Vermeidung von Absorptionseffekten durch das OH-Wasserband bei 2700 nm werden Quarze wie Infrasil® oder Suprasil® 300 verwendet.

Bei Infrasil® handelt es sich um einen synthetischen Quarz, der durch elektrisches Verschmelzen von Quarzkristallen hoher Qualität hergestellt wird.

Die metallischen Verunreinigungen im Infrasil® sind im Vergleich zu Suprasil® etwas höher. Hieraus ergibt sich eine reduzierte UV-Transmission. Der OH-Gehalt ist hingegen niedriger, wodurch eine höhere Transmission im IR-Bereich erreicht wird.

Suprasil® 300 ist ein hochreines, synthetisches Quarzglas, das durch Flammenhydrolyse von SiCl_4 hergestellt wird. Durch einen zwischengeschalteten Trocknungsschritt wird der OH-Gehalt des Quarzglases auf unter 1 ppm reduziert.

Suprasil® 300 zeigt daher keine Absorptionsbanden im sichtbaren und infraroten Spektralbereich. Aufgrund des Trocknungsschritts besitzt das Material einen Chlor-Gehalt von 1000 - 3000 ppm und eine zu längeren Wellenlängen verschobene UV-Absorptionskante.

Synthetic Quartz – IR

Infrasil®, Suprasil® 300

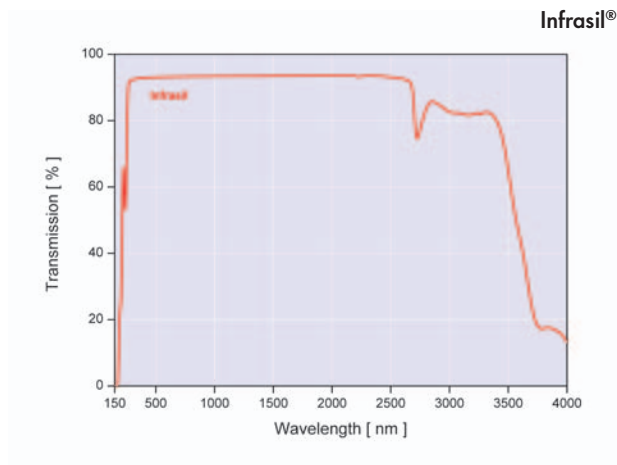
Quartzes such as Infrasil® or Suprasil® 300 are used for applications in the IR range to about 3000 nm and to prevent absorption effects due to the OH water band at 2700 nm.

Infrasil® is a synthetic quartz that is manufactured by electrically melting high quality quartz crystals.

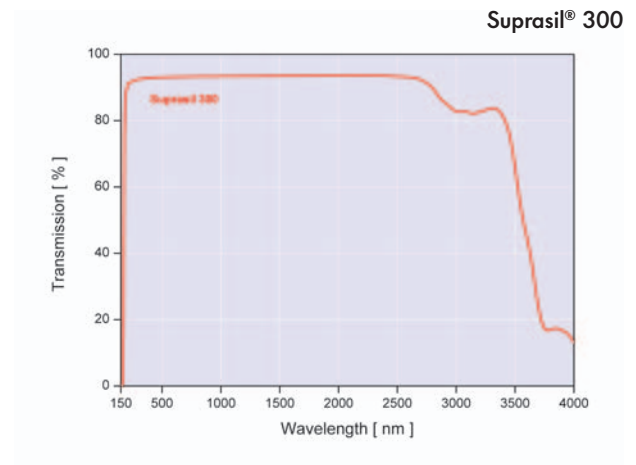
The metallic contamination in Infrasil® is a little bit higher than in Suprasil®. This results in a reduced UV transmission. On the other hand, the OH content is lower, which leads to a higher transmission in the IR range.

Suprasil® 300 is a highly pure synthetic quartz glass that is manufactured from SiCl_4 via flame hydrolysis. On account of an additional drying step, the OH content of the quartz glass is reduced to less than 1 ppm.

Therefore, Suprasil® 300 does not exhibit any absorption bands in the visible and infrared spectral ranges. As a result of the drying step, this material has a chlorine content of 1000 - 3000 ppm and a UV absorption slope shifted to longer wavelengths.



Typical transmission of Infrasil® including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.



Typical transmission of Suprasil® 300 including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

BK7

BK7 sind Borosilikat-Krongläser mit herausragender optischer Homogenität. LASER COMPONENTS setzt dieses Glas ein, wenn sowohl in Transmission als auch in Reflexion besonders hohe Anforderungen an die Güte des Glases gestellt werden.

BK7 ist das am häufigsten verwendete Material bei Laseroptiken. Es zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

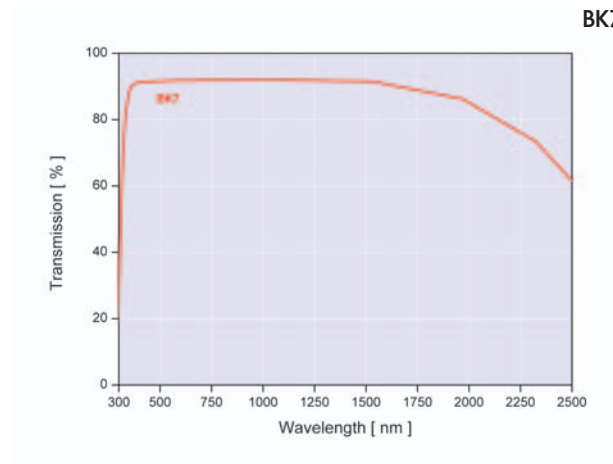
- Hervorragende Qualität bei niedrigem Preis.
- Sehr gute Verarbeitungs-Eigenschaften; einfach zu polieren. Die erreichbare Politurgüte ist für Hochleistungslaser-Anwendungen geeignet.
- Material ist in Transmission im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 2000 nm uneingeschränkt einsetzbar.
- Bei Anwendung als HR-Spiegel kann das Material auch außerhalb dieses Wellenlängenbereichs eingesetzt werden, da die Strahlung hier nicht ins Material vordringt.

BK7

BK7 are borosilicate crown glasses with exceptional optical homogeneity. LASER COMPONENTS uses this glass when especially high demands of quality are put on the glass in both transmission and reflection.

BK7 is the most commonly used materials in laser optics. They feature the following:

- Excellent quality at a low price.
- Very good to process; easy to polish. The achievable polishing quality is suited for high power laser applications.
- Material can be used without exception in transmission in the wavelength range from 400 nm to 2000 nm.
- When used as HR mirror, this material can also be used outside of this wavelength range because the beam does not penetrate the material.



Typical transmission of BK7 including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Saphir

Saphir ist ein synthetisches, monokristallines Aluminiumoxid. Aufgrund seiner Struktur ist es optisch stark anisotrop. Die exakten optischen Eigenschaften sind abhängig von der Orientierung der kristallographischen Achse relativ zur optischen Achse. LASER COMPONENTS verwendet standardmäßig eine „random“-Orientierung bei Saphir. Sollten Sie eine bestimmte Orientierung wünschen, so teilen Sie diese mit.

Gegenüber dem synthetischen Quarz hat Saphir eine fünfmal höhere Bruchfestigkeit und ausgezeichnete Transmissionseigenschaften vom UV- bis in den IR-Bereich bei 5 μm .

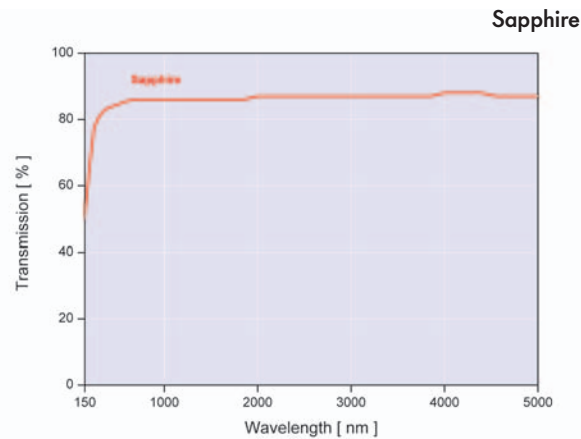
Aufgrund seiner Härte ist die Bearbeitung und Politur jedoch viel aufwändiger als beispielsweise bei Quarz oder BK7.

Sapphire

Sapphire is a synthetic, monocrystalline aluminum oxide. Because of its structure, it is optically strongly anisotropic. The exact optical features depend on the orientation of the crystallographic axis relative to the optical axis. LASER COMPONENTS uses a "random" orientation on a standard basis in sapphire. If you require a specific orientation, simply let us know when placing your order.

Sapphire has a breaking strength five times that of synthetic quartz and excellent transmission properties from the UV to the IR range at 5 μm .

Due to its hardness, however, the processing and polishing is much more extensive than for fused silica or BK7.



Typical transmission of Sapphire including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

CaF₂

CaF₂ sind synthetisch hergestellte Kristalle, die sich durch einen sehr breiten spektralen Transmissionsbereich von etwa 150 nm bis über 5 μm auszeichnen.

Kalziumfluorid-Einkristalle kommen in der Mikrolithografie für Belichtungs- und Projektionsoptiken bei 248 nm und 193 nm zum Einsatz. Die sehr hohe Widerstandsfähigkeit bei Excimer Laseranwendungen macht CaF₂ zum bevorzugten Material. Kalziumfluorid ist weitestgehend resistent gegen aggressive Excimer-Lasergase und kann daher in der Kavität genutzt werden.

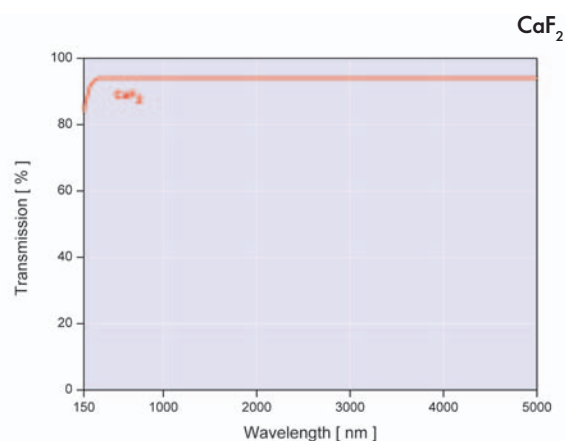
Ferner ist CaF₂ aufgrund der breitbandigen Transmission ein häufig verwendetes Material im IR-Bereich.

CaF₂

Synthetic calcium fluoride crystals CaF₂ offer a very broad spectral transmission range from approx. 150 nm to above 5 μm .

Calcium fluoride single crystals are required in microlithography for illumination and projection optics at 248 nm and 193 nm. The very high laser durability of CaF₂ makes it the first choice material for excimer laser optics. Calcium fluoride is, for the most part, resistant against aggressive excimer laser gases and can be used inside the cavity.

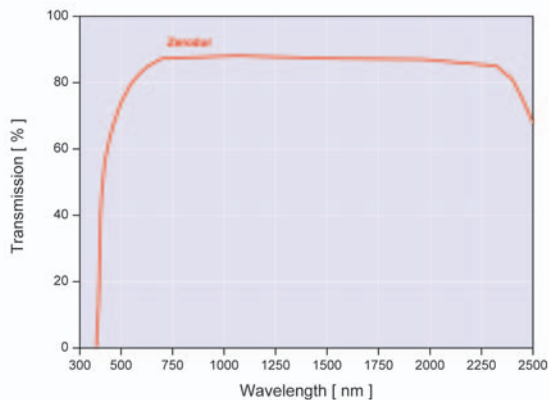
The material is also very common in the IR range due to the broad transmission range.



Typical transmission of CaF₂ including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Zerodur®

Zerodur® ist eine Glaskeramik mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von annähernd Null. Die Substrate werden eingesetzt, wenn eine maximale Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen erforderlich ist. Empfohlen wird Zerodur® bspw. für den Einsatz als Interferometer-Spiegel.

Zerodur®

Typical transmission of Zerodur® including Fresnel reflection losses for 10 mm pass length.

Zerodur® is a glass ceramic with a thermal expansion coefficient of almost zero. These substrates are used when a maximum insensitivity to temperature fluctuations is required. Zerodur® is recommended, for example, for use in interferometer mirrors.

Brechungsindex

Vor allem bei der Verwendung als Linse ist der Brechungsindex des Materials relevant. Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Brechungsindizes für verschiedene gängige Materialien bei unterschiedlichen Laser-Wellenlängen.

Bei doppelbrechenden Materialien, wie bei Saphir oder MgF_2 , ist der Wert sowohl für die ordentliche n_o als auch für die außerordentliche Brechzahl n_e angegeben.

Refractive Index

The refractive index of the material is primarily relevant when used as a lens. The following tables show the refractive indices of different common materials at various laser wavelengths.

For birefringent materials such as sapphire or MgF_2 , the values of both the ordinary n_o and the extraordinary refractive index n_e are given.

Brechungsindex ausgewählter Materialien für UV-Wellenlängen**Refractive Index of Some Materials for UV Wavelengths**

Wavelength [nm]	Fused Silica n	Sapphire n_o	Sapphire n_e	CaF_2 n	MgF_2 n_o	MgF_2 n_e
193	1.561	1.929	1.917	1.502	1.428	1.441
213	1.535	1.889	1.878	1.485	1.416	1.429
222	1.527	1.875	1.865	1.480	1.412	1.425
226	1.523	1.870	1.860	1.478	1.410	1.424
244	1.511	1.851	1.841	1.470	1.404	1.417
248	1.509	1.847	1.837	1.468	1.403	1.416
257	1.504	1.840	1.830	1.465	1.401	1.414
266	1.500	1.833	1.824	1.462	1.399	1.412
280	1.494	1.824	1.815	1.458	1.396	1.409
308	1.486	1.811	1.802	1.453	1.392	1.404
325	1.482	1.805	1.796	1.450	1.390	1.402
337	1.479	1.801	1.792	1.448	1.389	1.401
351	1.477	1.797	1.788	1.446	1.387	1.400
355	1.476	1.796	1.787	1.446	1.387	1.399

Brechungsindex ausgewählter Materialien für VIS und IR-Wellenlängen

Refractive Index of Some Materials for Vis and IR Wavelengths

Wave-length [nm]	Fused Silica n	Sapphire n _o	Sapphire n _e	CaF ₂ n	BK7 n	SF6 n	SF10 n	SF11 n	SF14 n
400	1.470	1.787	1.778	1.442	1.531	1.867	1.778	1.845	1.819
442	1.466	1.780	1.772	1.439	1.526	1.844	1.760	1.822	1.797
458	1.465	1.778	1.770	1.438	1.525	1.838	1.754	1.816	1.791
488	1.463	1.775	1.767	1.437	1.522	1.827	1.746	1.806	1.782
515	1.462	1.773	1.765	1.436	1.520	1.820	1.740	1.799	1.775
532	1.461	1.772	1.764	1.435	1.519	1.816	1.737	1.795	1.771
633	1.457	1.766	1.758	1.433	1.515	1.799	1.723	1.779	1.756
670	1.456	1.764	1.756	1.432	1.514	1.795	1.720	1.775	1.752
694	1.455	1.763	1.755	1.432	1.513	1.792	1.718	1.772	1.750
755	1.454	1.761	1.753	1.431	1.512	1.787	1.714	1.768	1.746
780	1.454	1.761	1.753	1.431	1.511	1.786	1.712	1.766	1.744
800	1.453	1.760	1.752	1.431	1.511	1.784	1.711	1.765	1.743
820	1.453	1.760	1.752	1.430	1.510	1.783	1.710	1.764	1.742
860	1.452	1.759	1.751	1.430	1.510	1.781	1.709	1.762	1.740
980	1.451	1.756	1.748	1.429	1.508	1.776	1.704	1.757	1.735
1047	1.450	1.755	1.747	1.429	1.507	1.774	1.703	1.755	1.733
1064	1.450	1.754	1.747	1.428	1.507	1.774	1.702	1.754	1.733
1320	1.447	1.750	1.742	1.427	1.503	1.768	1.697	1.749	1.728
1550	1.444	1.746	1.738	1.426	1.501	1.764	1.693	1.745	1.724
2010	1.438	1.737	1.730	1.424	1.494	1.758	1.687	1.738	1.717
2100	–	1.736	1.728	1.423	–	1.756	1.686	1.736	1.716
2300	–	1.731	1.723	1.422	–	1.753	1.682	1.733	1.712
2500	–	1.726	1.719	1.421	–	1.750	–	–	–
2700	–	1.721	1.713	1.420	–	–	–	–	–
2940	–	1.714	1.706	1.418	–	–	–	–	–
4000	–	1.675	1.668	1.410	–	–	–	–	–
5000	–	1.624	1.618	1.399	–	–	–	–	–

Basic Principles

Optimal Lens

Optimal Material

Coating-Information

Specifications

Cleaning

Wissenswertes über Beschichtungen

Valuable Information on Coatings



Definition der Polarisationsrichtung	32	Polarization Direction for a Laser Beam	32
Spiegeleinsatz bei verschiedenen Winkeln	33	Mirrors at Different Angles	33
Typ. Bandbreiten bei dielektr. Beschichtungen	34	Typical Bandwidths of Dielectric Coatings	34
Regel für Kurzpass- und Langpass-Spiegel	36	Rules for Short-pass and Long-pass Mirrors	36
Kombination von Beschichtungen	36	Combination of Coatings	36
Zerstörschwellenmessung	37	Damage Threshold Measurement	37

Wissenswertes über Beschichtungen

Für die Entwicklung Ihres optischen Systems und die Auswahl der optischen Komponenten ist es sinnvoll, Grundkenntnisse im Bereich der Beschichtung zu besitzen. Diese vermitteln wir Ihnen auf den folgenden Seiten. Bei weiterreichenden Fragen verweisen wir auf das LASER COMPONENTS Optik-Team, welches Sie jederzeit gern berät.



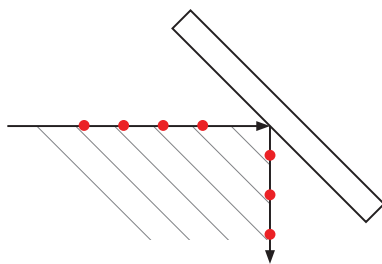
For the development of your optical system and the selection of optical components, it makes sense to have basic knowledge about the subject of coatings. We will give you a brief introduction on coatings in the following pages. For more in-depth questions, we can point you to our LASER COMPONENTS optics team, the members of which would be happy to assist you further.

Definition der Polarisationsrichtung für Laserstrahlung

Licht kann als transversale Welle beschrieben werden, die zwei Polarisationsrichtungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufweist. Dieser Effekt wird häufig ausgenutzt, um eine optimale Performance bei den Beschichtungen zu erreichen.

Bestimmung der Polarisationsrichtung

Die Kenntnis über die Polarisationsrichtung ist bereits bei der Planung eines Systems entscheidend. Häufig wird die Polarisation zur Tischebene beschrieben, auf der das System aufgebaut wird. Die Umlenkung findet jedoch nicht immer in der Tischebene statt, weswegen im weiteren Verlauf von der Umlenkebene gesprochen wird. Diese wird vom einfallenden und reflektierten Strahl aufgespannt.



s-pol Umlenkung:
Strahl ist senkrecht zur Umlenkebene polarisiert

s-pol reflection:
Beam is polarized perpendicular to the bending plane

Reflexionsverhältnis bei dielektrischen Beschichtungen

Die Reflexionswerte von u-pol, s-pol und p-pol stehen bei Umlenkspiegeln in einem festen Verhältnis zueinander.

Für einen Einfallswinkel von 45° gilt:

$$R_{u-pol} = 0.5 \times (R_{p-pol} + R_{s-pol})$$

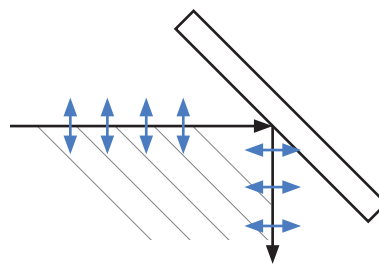
Valuable Information on Coatings

Definition of the Direction of Polarization for a Laser Beam

Light is described as a transversal wave that can have two directions of polarization perpendicular to the direction of propagation. This effect is often used to achieve an optimal coating performance.

Determining the Direction of Polarization

Knowing the direction of polarization is crucial, even in the planning stage of a system. The polarization is often described in relation to the plane of the table on which the system is based. However, reflection does not always occur in the table plane, which is why we will be referring to the bending plane in the following. It is defined by the incident beam and the reflected beam.



p-pol Umlenkung:
Strahl ist parallel zur Umlenkebene polarisiert

p-pol reflection:
Beam is polarized parallel to the bending plane

Reflection Ratio of Dielectric Coatings

The u-pol, s-pol, and p-pol reflection values of bending mirrors correlate at a fixed ratio with each other.

The following applies for an angle of incidence of 45°:

$$R_{u-pol} = 0.5 \times (R_{p-pol} + R_{s-pol})$$

Spiegeleinsatz bei verschiedenen Winkeln

Die Beschichtung eines dielektrischen Spiegels ist in der Regel für einen einzigen Einfallswinkel definiert. Wird dieser Spiegel unter einem anderen Einfallswinkel verwendet, so verschieben sich die Zentralwellenlänge und der Reflexionsbereich des Spiegels.

0° Spiegel bei 45° Einfallswinkel eingesetzt

Die Zentralwellenlänge des Spiegels verschiebt sich in diesem Fall zu kürzeren Wellenlängen. Es gilt:

$$\lambda_{\text{Zentral}}(45^\circ) \approx \lambda_{\text{Zentral}}(0^\circ) \times 0.9$$

45° Spiegel bei 0° Einfallswinkel eingesetzt

Die Zentralwellenlänge verschiebt sich hierbei entsprechend zu den längeren Wellenlängen. Es gilt:

$$\lambda_{\text{Zentral}}(0^\circ) \approx \lambda_{\text{Zentral}}(45^\circ) \times 1.1$$

Mirrors at Different Angles

The coating on a dielectric mirror is generally only defined for a single angle of incidence. If this mirror is used at a different angle of incidence, the central wavelength and the range of reflection for the mirror are shifted.

0° mirrors used at an angle of incidence of 45°

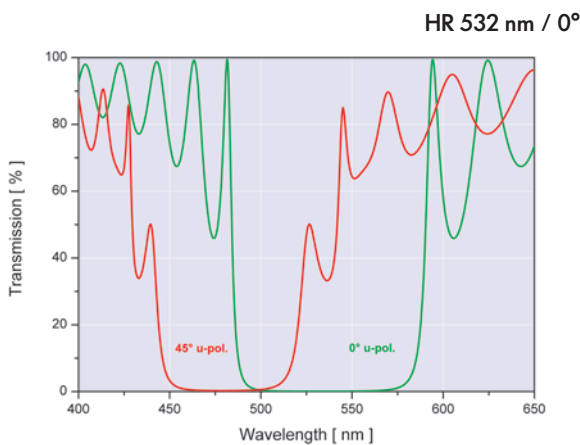
In this case, the central wavelength of these mirrors is shifted to shorter wavelengths. The following applies:

$$\lambda_{\text{Central}}(45^\circ) \approx \lambda_{\text{Central}}(0^\circ) \times 0.9$$

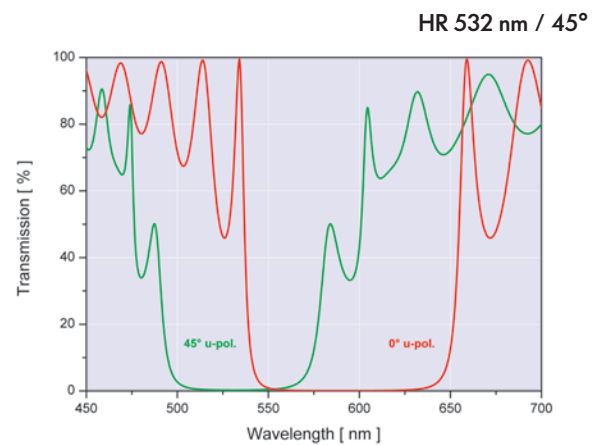
45° mirrors used at an angle of incidence of 0°

The central wavelength of these mirrors is shifted to longer wavelengths. The following applies:

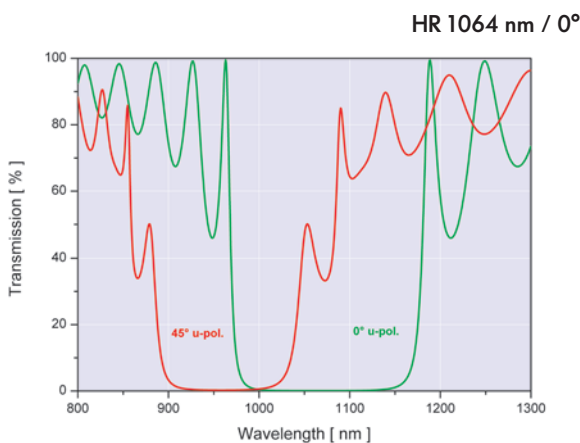
$$\lambda_{\text{Central}}(0^\circ) \approx \lambda_{\text{Central}}(45^\circ) \times 1.1$$



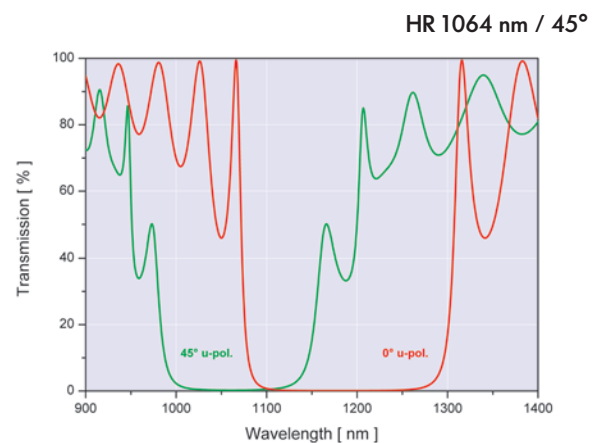
0° mirror; used at 45°



45° mirror; used at 0°



0° mirror; used at 45°



45° mirror; used at 0°

Typische Bandbreiten bei dielektrischen Beschichtungen

Die Bandbreiten von dielektrischen Beschichtungen sind sowohl abhängig von der Zentralwellenlänge λ_{Zentral} und dem Einfallswinkel als auch von dem verwendeten Beschichtungsdesign und den verwendeten Beschichtungsmaterialien. Bei einem von Null abweichenden Einfallswinkel muss zusätzlich die Polarisationsabhängigkeit berücksichtigt werden.

Als Faustformeln sollten die im Folgenden aufgelisteten Regeln beachtet werden.

Die Reflexionswerte können generell nicht über die gesamte Bandbreite $\Delta\lambda$ garantiert werden. Die folgenden Angaben dienen als Richtwert.

Die typische Bandbreite $\Delta\lambda$ ist als Wellenlängenbereich definiert für den gilt:

$R > 99\%$ für Einfallswinkel 0°

$R > 98\%$ für Einfallswinkel 45°

Typische Bandbreiten von High-Power Beschichtungen 266 nm bis 2000 nm:

■ Endspiegel (0° Einfallswinkel)

$$\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.1$$

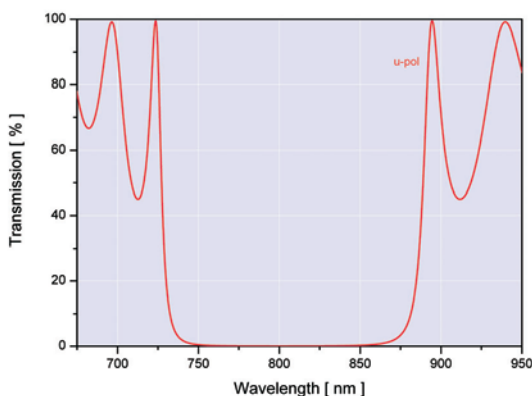
■ Umlenkspiegel (45° Einfallswinkel)

u-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.1$

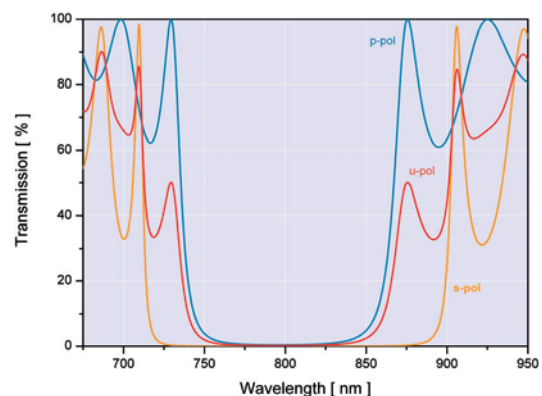
s-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.15$

p-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.05$

HR 800 nm / 0° ; high power



HR 800 nm / 45° ; high power



Typical Bandwidths of Dielectric Coatings

The bandwidths of dielectric coatings are dependent on the central wavelength λ_{Central} and the angle of incidence as well as on the coating design and coating materials used. The polarization dependency must also be considered if the angle of incidence deviates from zero.

As a rule of thumb, the following standards should be noted.

Generally, reflection values cannot be guaranteed across the whole bandwidth $\Delta\lambda$. The following information serves as orientation.

The typical bandwidth $\Delta\lambda$ is defined as wavelength range for which:

$R > 99\%$ for AOI 0°

$R > 98\%$ for AOI 45°

Typical Bandwidths of High Power Coatings 266 nm to 2000 nm:

■ End mirrors (0° angle of incidence)

$$\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.1$$

■ Bending mirrors (45° angle of incidence)

u-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.1$

s-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.15$

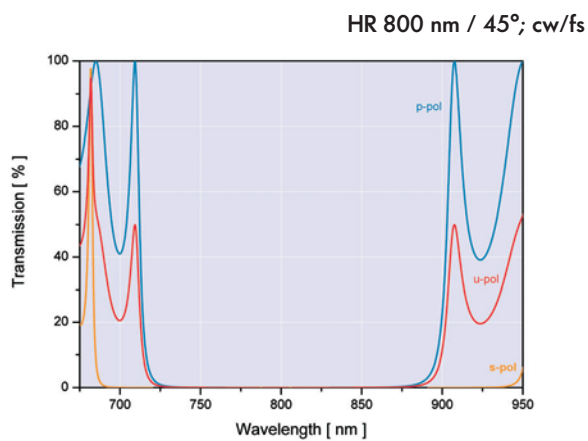
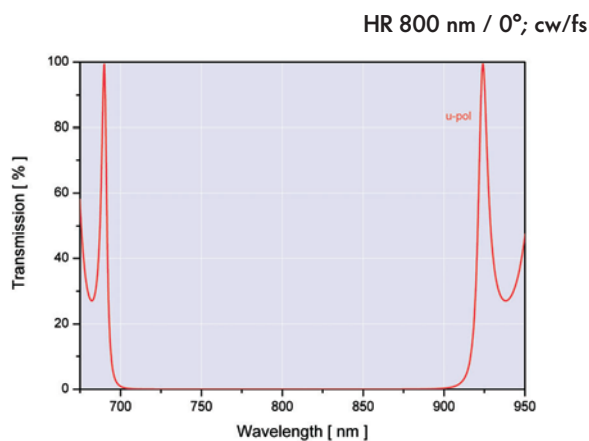
p-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.05$

Typische Bandbreiten von cw-/fs-Beschichtungen 450 nm bis 1600 nm

- Endspiegel (0° Einfallswinkel)
 $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.15$
- Umlenkspiegel (45° Einfallswinkel)
 u-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.15$
 s-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.25$
 p-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Zentral}} \times 0.1$

Typical Bandwidths of cw/fs Coatings 450 nm to 1600 nm

- End mirrors (0° angle of incidence)
 $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.15$
- Bending mirrors (45° angle of incidence)
 u-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.15$
 s-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.25$
 p-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.1$



Center Wavelength [nm]	AOI 0°	AOI 45°		
	$\Delta\lambda$ for R > 99%	u-pol: $\Delta\lambda$ for R > 98%	s-pol: $\Delta\lambda$ for R > 98%	p-pol: $\Delta\lambda$ for R > 98%
266	± 13 nm	± 13 nm	± 20 nm	± 7 nm
355	± 15 nm	± 15 nm	± 25 nm	± 8 nm
532	± 25 nm	± 25 nm	± 35 nm	± 13 nm
800 high power coating	± 40 nm	± 40 nm	± 60 nm	± 20 nm
800 cw/fs coating	± 60 nm	± 60 nm	± 100 nm	± 30 nm
1064	± 50 nm	± 50 nm	± 78 nm	± 25 nm

All values refer to high power coating unless stated otherwise.

„Goldene Regeln“ für Kurzpass- und Langpass-Spiegel

Bei der Entscheidung, ob ein Langpass- oder Kurzpassspiegel zur Trennung mehrerer Wellenlängen eingesetzt wird, können Sie folgende Regeln anwenden.

■ Bandbreite

Die Bandbreite für den reflektierten Strahlanteil ist limitiert. Für die bestmögliche Strahlteilung bzw. -kombination ist es daher besser, einen Wellenlängenbereich zu transmittieren und einzelne Wellenlängen zu reflektieren.

Beispiele: HR1064HT400-700
HR355HT532+1064

■ Polarisation

Der absolute Reflexionsgrad ist für s-polarisiertes Licht höher als für p-polarisiertes Licht. Bei der Transmission verhält es sich anders herum. Beachten Sie daher die Polarisationen in Ihrem Aufbau.

■ Reflexion besser als Transmission

Die Effizienz ist für den reflektierten Strahl höher. Benötigen Sie für Ihre Anwendung eine hohe Effizienz bei einer bestimmten Wellenlänge, so berücksichtigen Sie dies bei der Auswahl des Spiegels.

■ Strahlkombination von SHG, THG, ...

Bei den entsprechenden Anteilen $\lambda/2$, $\lambda/3$,... der reflektierten Wellenlänge entsteht ein Reflexionspeak. In diesem Fall sollte eine Langpass-Beschichtung bevorzugt werden. Beispiel: Statt einer HR1064+532HT355 Beschichtung käme eher eine HR355HT532+1064 Beschichtung in Frage.

“Golden Rules” for Short-pass and Long-pass Mirrors

When deciding whether to use a long-pass or short-pass mirror to separate several wavelengths, the following rules can be applied.

■ Bandwidth

The bandwidth for the reflected part of the beam is limited. For the best possible beam division or combination, it is important to allow a wavelength range to be transmitted and individual wavelengths to be reflected.

Examples: HR1064HT400-700
HR355HT532+1064

■ Polarization

The absolute degree of reflection is higher for s-polarized light than it is for p-polarized light. For transmission the relationship is the exact opposite. Therefore, keep the polarizations in your assembly in mind.

■ Reflection better than transmission

The reflection of a beam is more efficient. If you require greater efficiency at a certain wavelength for your application, consider this when selecting a mirror.

■ Beam combination of SHG, THG, ...

A reflection peak is generated at the corresponding $\lambda/2$, $\lambda/3$,... parts of the reflected wavelength. A long-pass coating should be the preferred choice for this combination.

Example: Instead of an HR1064+532HT355 coating, an HR355HT532+1064 coating would be preferred.

Kombination von Beschichtungen

Mit unseren modernen Beschichtungsanlagen können in einem Beschichtungsvorgang verschiedene Coatings miteinander kombiniert werden. Profitieren Sie davon, um Ihre Beschichtungskosten zu minimieren.

Folgende Kombinationen können in einer Charge gefertigt werden:

- Unterschiedliche Einfallswinkel
- Verschiedene Zentralwellenlängen (Unterschied $\pm 10\%$)
- Hoch- und teilreflektierende Beschichtungen
- Unterschiedliche Substratabmessungen
- Bedingt unterschiedliche Substratmaterialien

Combination of Coatings

- With our modern coating equipment, different coatings can be combined with one another in one coating run. You will profit from these options and minimize your coating expenses.
- The following combinations can be manufactured in one batch:
- Different angles of incidence
- Various central wavelengths (difference of $\pm 10\%$)
- Highly and partially reflective coatings
- Different substrate dimensions
- To some extent different substrate materials

Zerstörschwellenmessung

Moderne gütegeschaltete Laser mit ns-Pulsen oder ps- und fs-Systeme können sehr hohe Leistungsdichten erreichen. Die Höhe der Leistung ist durch verschiedene Faktoren limitiert. Hierzu zählen u. a. die Zerstörschwelle des optischen Materials, die dielektrische Beschichtung und das aktive Lasermaterial selbst. Die Zerstörschwelle optischer Bauelemente ist im Wesentlichen durch die Laserfestigkeit des Substratmaterials und der aufgetragenen Beschichtung gegeben. Entscheidende Laserkriterien, die hierbei berücksichtigt werden müssen, sind: Leistungsdichte, Pulsenergie, Strahlgeometrie, Strahlquerschnitt, Strahlfokussierung, Pulsdauer, Pulsfrequenz, zeitliche Pulsform sowie Einschwingverhalten und Feldstärkenverteilung.

Bei der Entwicklung leistungsfähiger Laser und dazugehöriger Komponenten haben LIDT-Messungen (Laser Induced Damage Threshold) eine herausragende Aufgabe. Zur Charakterisierung optischer Laserkomponenten, insbesondere der Beschichtungen, werden zuverlässige und reproduzierbare Verfahren eingesetzt, die im Folgenden erläutert werden. Bei diesen Prozessen handelt es sich um standardisierte und normierte Verfahren, die es erlauben, die Zerstörfestigkeit von Laseroptiken einzuordnen.

Prüfverfahren nach ISO 11254

Bei den Prüfverfahren wird zwischen zwei standardisierten Methoden unterschieden.

Einzelpulsmessungen

Die Einzelpulsmessungen werden mit 1-on-1 bezeichnet. Dabei wird jeder Messpunkt eines Substrats mit jeweils einem Laserpuls definierter Energie bestrahlt.

Multipulsverfahren

Bei dem Multipulsverfahren handelt es sich um so genannte S-on-1 Messungen, d.h. eine Position wird mit einer Pulssequenz von S Pulsen hoher Repetitionsrate bestrahlt. Die Einzelpulsmessung ist damit ein Sonderfall des Multipulsverfahrens mit $S = 1$. Typische Werte für S-on-1 Messungen reichen bis zu $S = 100000$ und mehr. Dadurch kann das Langzeitverhalten einer optischen Komponente untersucht werden.

Messgrundlagen S-on-1 Messung

Maßgeblich für die Qualität der Messungen ist der Messaufbau, bestehend aus Lasersystem, variablem Energieabschwächer, Fokussiereinheit, Strahldiagnose, einer verschiebbaren Substrathalterung und einer in-situ Detektion entstandener Schäden.

Für Nanosekundenpulse wird meist ein stabiles System aus einem mit Blitzlampen gepumpten Nd:YAG Laser mit einer Oszillator-Verstärker-Einheit verwendet. Die Wellenlänge liegt typischerweise bei 1064 nm und höheren Harmonischen davon; das Strahlprofil besitzt einen gaußförmigen Querschnitt. Für die Untersuchung des Verhaltens bei Femtosekundenpulsen kommt meist ein Ti:Sa-System mit einer Zentralwellenlänge von 800 nm zum Einsatz.

Die Energiedichte eines jeden Pulses wird ständig mitgemessen. Zur Detektion entstandener Schäden wird während der Messung ein Mikroskopobjektiv mit über 100-facher Vergrößerung

Damage Threshold Measurement

Modern Q-switched lasers with ns pulses or ps and fs systems can achieve very high power densities. The amount of power is restricted by various factors, including but not limited to the damage threshold of the optical material, the dielectric coating, and the active laser material itself. The damage threshold of optical components is determined to a large extent by the laser resistance of the substrate material and the coating applied. Crucial laser criteria that must be taken into account include the following: power density, pulse energy, beam geometry, beam cross section, beam focussing, pulse duration, pulse repetition rate, temporal pulse form, and transient response and field strength distribution.

The role of LIDT (laser induced damage threshold) measurements in the development of powerful lasers and their corresponding components is an important one. Reliable and reproducible methods are used in the characterization of optical laser components, in particular coatings. These methods are explained in more detail below. They are standardized and normalized processes that allow the damage resistance of laser optics to be assessed.

Inspection Methods According to ISO 11254

There are two different standard inspection methods.

Single Pulse Measurements

Single pulse measurements are identified as 1-on-1 measurements. In single pulse measurements, each point of measurement of a substrate is exposed to a laser pulse that has a specifically defined amount of energy.

Multi-pulse Method

In the multi-pulse method, so-called S-on-1 measurements are taken. That is to say, a position is exposed to a pulse sequence of S pulses that have a high repetition rate. Single pulse measurement is thus a special type of measurement of the multi-pulse method in which $S = 1$. Typical S-on-1 measurements reach values of $S = 100,000$ and up. This allows the long-term behavior of an optical component to be analyzed.

Fundamentals of S-on-1 Measurement

The measurement setup, which consists of a laser system, a variable energy attenuator, a focussing unit, beam diagnosis, a movable substrate mount, and the in situ detection of resulting damage, is crucial to achieving qualitative measurements.

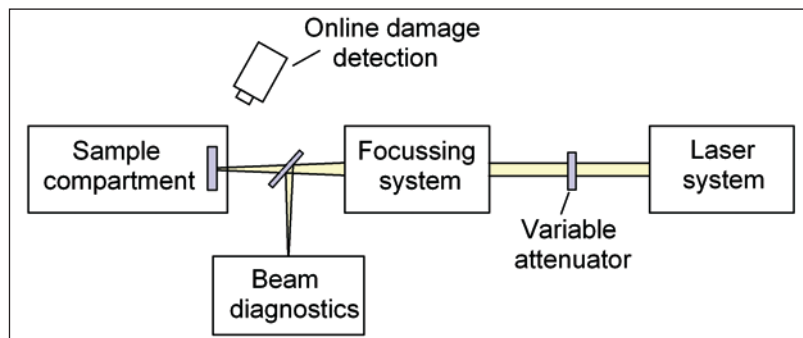
For nanosecond pulses, a stable system consisting of an Nd:YAG laser pumped with flash lamps is often used with an oscillator amplifier unit. Typically, the wavelength is 1064 nm or higher harmonics of this; the beam profile has a Gaussian shaped cross section. To analyze the behavior at femtosecond pulses, a Ti:Sa system with a central wavelength of 800 nm is generally used.

The energy density of each one of these pulses is measured constantly. To detect the resulting damage a microscope objective with a magnification of more than 100 is used during measurement. In addition, after measurement the substrates are analyzed using a Nomarski microscope.

ßung verwendet. Zusätzlich werden die Substrate nach der Messung unter einem Nomarski-Mikroskop beurteilt.

Ein Substrat wird üblicherweise in mehrere Segmente eingeteilt, die wiederum in mehrere unabhängige Messpunkte unterteilt sind. Der Abstand dieser Messpunkte sollte mehr als das sechsfache des Strahldurchmessers betragen. Jeder Messpunkt innerhalb eines Segments wird mit einer Pulsfolge konstanter Energiedichte beschossen, wobei diese Energiedichte von Segment zu Segment ansteigt. Wird nach einer Pulsanzahl N_{min} eine Beschädigung festgestellt, wird die Pulsfolge unterbrochen. Für diesen Messpunkt und die dazugehörige Energiedichte Q wird für Pulsanzahlen $N < N_{min}$ keine Zerstörung (Wert 0) und für $N \geq N_{min}$ eine Zerstörung (Wert 1) notiert.

A substrate is typically separated into several segments that are, in turn, divided into several independent measurement points. The distance between these measurement points should amount to more than six times the beam diameter. Each measurement point within a segment is hit with a pulse train of constant energy density, and this energy density increases from segment to segment. If damage results after reaching a number of pulses of N_{min} , pulse repetition is interrupted. For this measurement point and the corresponding energy density, Q , "no damage" (a value of 0) is noted for pulse quantities of $N < N_{min}$, whereas "damage" (a value of 1) is noted for pulse quantities of $N \geq N_{min}$.



Typ. Aufbau zur Zerstörschwellenmessung nach ISO 11254
Typical setup for damage threshold measurement according to ISO 11254

Beurteilung der Messung

Für jede Pulsanzahl N können nun die Zerstörungswerte der einzelnen Messpunkte über der eingestrahnten Energiedichte aufgetragen werden. Der Energiebereich zwischen dem geringsten Wert mit vorhandener Zerstörung und dem maximalen Wert ohne Zerstörung wird in mehrere Intervalle unterteilt. Innerhalb dieser Intervalle werden die Zerstörungswerte gemittelt und linear interpoliert. Der Schnittpunkt der so erhaltenen Gerade mit der Abszisse wird 0%-Schwellwert, oder auch ON SET Wert genannt. Der Energiewert, an welchen die Ausgleichsgerade die Zerstörungswahrscheinlichkeit 0,5 erreicht, wird als 50%-Schwellwert bezeichnet.

In einer ebenfalls sehr häufig anzutreffenden Darstellung werden die erhaltenen 0%- und 50%-Schwellwerte über der jeweiligen Pulszahl N aufgetragen. Daran lassen sich besonders gut akkumulative Effekte beobachten, woraus Rückschlüsse auf den Zerstörungsmechanismus gezogen werden können.

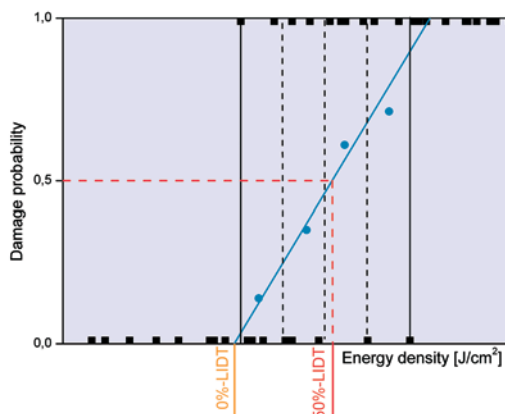
LASER COMPONENTS lässt seine Zerstörschwellentests an unabhängigen Instituten und Unternehmen nach ISO 11254 durchführen. Spezifiziert wird dabei der 50%-Schwellwert bei einem für die Anwendung typischen Strahldurchmesser. Besonders bei Nanosekundenpulsen kann durch eine höhere Fokussierung des Lasers dieser Schwellwert reduziert werden.

Measurement Assessment

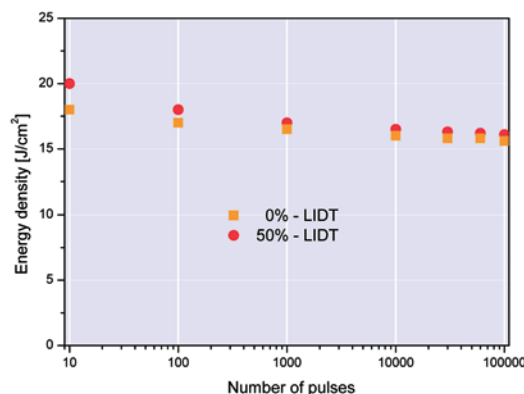
The damage values of individual measurement points can now be plotted against the applied energy density for each number of pulses, N . The range of energy between the lowest value with damage and the maximum value without damage is divided into several intervals. Within these intervals, the damage values are averaged and linearly interpolated. The point of intersection with the x-axis of the line obtained is called the 0% threshold, or ON SET value. The energy value, for which the best-fit straight line has a damage probability of 0.5, is referred to as the 50% threshold.

The 0% and 50% thresholds achieved here are also quite frequently plotted against each corresponding pulse value, N . This allows particularly accumulative effects to be observed, from which conclusions regarding the damage mechanism can be drawn.

LASER COMPONENTS allows its damage threshold tests to be performed according to ISO 11254 specifications at independent institutes and companies. There the 50% threshold is specified for a beam diameter common for the application. Focussing the laser can reduce this threshold, particularly in nanosecond pulses.



Die Zerstörschwellentests werden mit LC-Standard-Substraten aus Quarzglas mit Laserpolitur durchgeführt, da die Substratqualität auf die Zerstörschwelle einen erheblichen Einfluß haben kann. Bei Verwendung z.B. von CaF_2 oder Saphirsubstraten kann der Wert aufgrund der schlechteren Politurgüte nicht direkt entnommen werden.



Since the quality of a substrate can significantly affect the damage threshold, damage threshold tests are performed using LC's standard substrates made of laser-polished quartz glass. In contrast, using CaF_2 or sapphire substrates, for example, does not allow a value to be determined directly because of their poor polishing quality.

Ursachen der Zerstörung

Die Ursachen für laserinduzierte Zerstörung von dielektrischen Schichten sind sehr vielfältig. So können thermische Effekte bei hohen Leistungsdichten zu einer starken Temperaturerhöhung und Zerstörung der Beschichtung führen. Hohe Feldstärken führen zur Zerstörung, wenn geringe Pulsfolgefrequenzen bei hohen Energiedichten auftreten.

Einen großen Einfluss besitzen auch Verunreinigungen in Form von Schmutzpartikeln, Rückständen von Reinigungsmitteln, dünnen Filmen eines Klebers oder ähnliches. Schon kleinste Veränderungen können die Zerstörschwelle von Optiken dramatisch absenken. Um die spezifizierten LIDT-Werte zu erreichen, ist deshalb für höchste Sorgfalt beim Umgang mit den Optiken zu sorgen.

Um die Ursachen zu untersuchen, die zu einer Beeinträchtigung bzw. zur Zerstörung der Oberfläche geführt haben, können Untersuchungen der Zerstörmorphologien ein geeignetes Mittel darstellen. Unter Zerstörmorphologien werden dabei die Form und der Aufbau der Schicht bzw. die Kristallzerstörung verstanden.

Causes of Damage

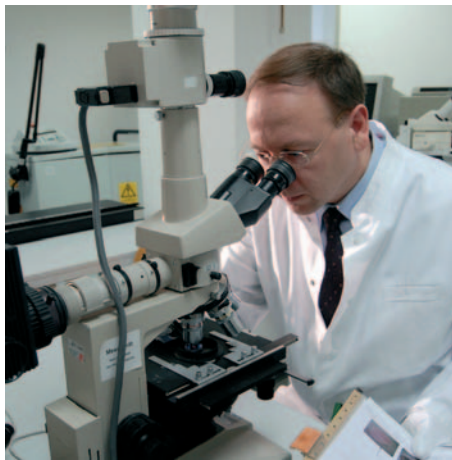
The causes of laser-induced damages to dielectric layers can be manifold. Thermal effects at high power densities can lead to a strong temperature increase and a subsequent destruction of the coating. High field strengths also lead to a destruction when high energy densities at low repetition rates impact.

Contamination in the form of dust particles or residue from cleansers, the thin film left behind from adhesives, and the like also have a large effect on the damage threshold. Even the smallest changes can reduce the damage threshold of optics dramatically. To achieve the specified LIDT values it is imperative that optics be handled with extreme care.

Analyzing damage morphology can prove to be a valuable means of determining the cause of erosion or damage to a surface. Damage morphology refers to the form and design of a coating or to crystal damage.

Spezifikation bei LASER COMPONENTS

Specifications at LASER COMPONENTS



Materialwahl	42	Choice of Material	42
Blasen- und Schlierenklassen	43	Classifications of Bubbles and Striae	43
Passfehler	46	Surface Figure Error	46
Zentriergenauigkeit	49	Centering Accuracy	49
Oberflächenfehler	50	Surface Quality	50
Oberflächengüte	51	Surface Finish	51
Kennzeichnung von Beschichtungen	53	Labelling of Coatings	53
Praktisches Beispiel	53	Concrete Example	53

Spezifikation bei LASER COMPONENTS

Damit optische Bauteile auf dem Gebiet der Laseroptik ihr Aufgabenspektrum zur höchsten Zufriedenheit des Anwenders erfüllen, werden von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) Richtlinien herausgegeben, die helfen, Optiken einheitlich zu spezifizieren.

Basierend auf der DIN ISO 10110-Norm (Februar 2000), wird dieser Leitfaden den korrekten Umgang mit Laseroptiken zusammenfassen und erläutern. Neben der an die Anwendung gebundenen Wahl des Substratmaterials gibt der Leitfaden Auskunft über die wichtigen Spezifikationen (z. B. bei Materialfehlern) und deren Klasseneinteilungen, die bei der Verifizierung der Optiken eine zentrale Rolle spielen. Zudem bietet diese Zusammenfassung einen Einblick in bedeutsame Prüfkriterien.



The International Standards Organization (ISO) has issued guidelines to help specify optics in a uniform manner; therefore, laser optical components can fulfill their tasks to the user's fullest expectations.

Based on the DIN ISO 10110 norm (February 2000), this guideline will summarize and explain the correct handling of laser optics. In addition to the choice of substrate material – which is dependent on the application – this guideline states the most important specifications (e.g. for material imperfections) and their classifications, which play a central role when verifying optics. This summary also lists important criteria for examination.

Materialwahl

LASER COMPONENTS bezieht das Material für Laseroptiken ausschließlich von namhaften Herstellern.

Die wichtigsten Substratkriterien sind:

- Blasen- und Schlierenfreiheit
- Homogenität
- Spektrales Absorptionsverhalten
- Polierbarkeit
- Brechungsindex n
- Härte
- Wärmeausdehnungskoeffizient

Aus dem Fluoreszenz- sowie spektralen Absorptionsverhalten ergibt sich das optimale Einsatzgebiet jedes Materials.

Qualitätsstufen

Häufig werden die Laseroptiken in Laserresonatoren eingesetzt. Die Anforderungen an die Passgenauigkeit und an die Leistungsbeständigkeit der Komponenten sind daher extrem hoch. Trotzdem ist in den meisten Fällen ein Standardmaterial wie BK7 ausreichend.

Nachstehende Tabelle listet typische Anwendungen der gebräuchlichsten Substratmaterialien auf.

Specification at LASER COMPONENTS

Choice of Material

LASER COMPONENTS obtains the material for laser optics exclusively from reputed manufacturers.

The most important substrate criteria are:

- Absence of bubbles and striae
- Homogeneity
- Spectral absorption behavior
- Polishability
- Index of refraction n
- Hardness
- Thermal expansion coefficient

The optimal application area for each material can be derived from its fluorescence and spectral absorption behavior.

Quality Levels

Laser optics are often used inside laser resonators. Therefore the demands on the surface figure and the ability of the components to withstand high power levels are extremely high. Nevertheless, a standard material like BK7 is sufficient in most cases.

The following table lists typical applications of the most common substrate materials.

Application Material	UV	Vis/NIR	IR		Extreme Power	Extreme Surface Figure	At Temp. Application > 80° C
	190 nm - 400 nm	400 nm - 1800 nm	up to 2.1 µm	up to 3 µm			
BK7 n = 1.51 at 1064 nm		■	♦				
B270 n = 1.52 at 550 nm		♦					
Floatglass n = 1.52 at 550 nm		♦ (low power e.g. protect. window)					
Sapphire (Random) n = 1.75 at 1064 nm		♦	♦	■			♦
UV-quartz ¹⁾ n = 1.45 at 1064 nm	■		♦ (2.1 µm - 2.9 µm)		♦ (super polished 5/4 x 0.01)	♦	♦
OH-free Quartz ²⁾ n = 1.45 at 1064 nm			■	○	♦ (super polished 5/4 x 0.01)		
CaF ₂ Monocrystalline n = 1.45 at 550 nm	♦			○			
MgF ₂ Monocrystalline n = 1.38 at 550 nm	♦			○			
Zerodur® n = 1.46 at 550 nm						■	♦

■ Hauptanwendung; ♦ Mögliche Anwendung;
○ Anwendung mit Einschränkungen
¹⁾ z. B. Suprasil® 1, Suprasil® 311, Suprasil® 312, C7980, Q0, Q1, Q2
²⁾ Infrasil® 301, Suprasil® 300

■ Main application; ♦ Possible application;
○ Application with limitations
¹⁾ e.g. Suprasil® 1, Suprasil® 311, Suprasil® 312, C7980, Q0, Q1, Q2
²⁾ Infrasil® 301, Suprasil® 300

Blasen- und Schlierenklassen

Blasen
Blasen sind Hohlräume mit kreisförmigem Querschnitt im Substrat, die bei der Glasfertigung auftreten können.

Schlieren
Räumlich verlaufende Einlagerungen, die sich von denen des Basismaterials unterscheiden, werden Schlieren genannt.

Blasenklassen

Nomenklatur
Nach DIN ISO 10110 werden „Blasen und andere Einschlüsse“ in der Form „Nx A“ angegeben. N stellt die Anzahl der Blasen und Einschlüsse mit einer maximal zulässigen Größe dar, die sogenannte Stufenzahl A (in mm) gibt das Maß ihrer Größe wieder. Sie ist als Quadratwurzel der projizierten Fläche der größten zulässigen Blase und/oder des Einschlusses definiert.

1/N x A 1: Codenummer für Blasen und Einschlüsse
N: Anzahl Blasen und Einschlüsse
A: Stufenzahl [mm]

Classifications of Bubbles and Striae

Bubbles
Bubbles are cavities with a circular cross section inside the substrate which can occur during the manufacture of the glass.

Striae
Spatial inclusions that differ from the base material are called striae.

Bubble Classes

Nomenclature
According to DIN ISO 10110, “bubbles and inclusions” are specified as “Nx A,” where A is the measure of maximum permissible inclusion size in mm and N denotes the total number of allowable inclusions at maximum size. A is defined as the square root of the projected area of the largest bubble and/or inclusion.

1/N x A 1: Code number for bubbles and inclusions
N: Number of bubbles and inclusions
A: Maximum permissible inclusion size [mm]

Die normgerechte Formulierung nach DIN ISO 10110 sei am Beispiel $1/3 \times 0.16$ erläutert. Die erste Ziffer charakterisiert, um welche Art von Spezifikation es sich handelt. Eine „1“ steht für Blasen und andere Einschlüsse. In unserem Beispiel ist folglich eine Blasenspezifikation angegeben. „ 3×0.16 “ sagt aus, dass höchstens 3 Blasen mit einer maximalen Stufenzahl von 0.16 zulässig sind. Hierbei wird von sog. Vorzugswerten gesprochen.

Folgende Tabelle gibt Auskunft über Aufteilungsfaktoren für Blasen und andere Einschlüsse.

Preferential Values	1	2.5	6.3	16
Size A in mm	0.006			
	0.010	0.006		
	0.016	0.010	0.006	
	0.025	0.016	0.010	0.006
	0.040	0.025	0.016	0.010
	0.063	0.040	0.025	0.016
	0.10	0.063	0.040	0.025
	0.16	0.10	0.063	0.040
	0.25	0.16	0.10	0.063
	0.40	0.25	0.16	0.10
	0.63	0.40	0.25	0.16
	1.0	0.63	0.40	0.25
	1.6	1.0	0.63	0.40
	2.5	1.6	1.0	0.63
	4.0	2.5	1.6	1.0

Berechnung der Substratqualität

Ist die Summe der projizierten Flächen der Blasen und Einschlüsse kleiner als die maximale Gesamtfläche $N \times A^2$, so kann mittels der Tabelle eine höhere Anzahl an Blasen und/oder Einschlüssen mit einer entsprechend kleineren Stufenzahl angegeben werden.

Die Angabe der Einschlüsse nach der DIN 10110 gibt immer die Werte mit der höchsten Stufenzahl an. Die Blasen und/oder Einschlüsse können in den spezifizierten Substraten jedoch auch in einer höheren Anzahl mit geringerer Ausdehnung auftreten. Dies berechnet sich wie folgt.

Beispiel:

Die Angabe $1/2 \times 0.040$ besagt, dass maximal zwei Blasen (N) der Stufenzahl 0.040 (A) auftreten können. Ein Blick in die Vorzugswerte, die in der ersten Tabellenspalte aufgelistet sind, zeigt die gesuchte Stufenzahl in mm. Die Multiplikationsspalte „2.5“ rechts neben den Vorzugswerten zeigt die Stufenzahl 0.025. Demnach besitzen etwa $2 \times 2.5 = 5$ Blasen und/oder Einschlüsse die Stufenzahl 0.025. Nach diesem Prinzip können weitere Werte bis zum Multiplikationsfaktor 16 berechnet werden. In dem angegebenen Substrat wären somit etwa $2 \times 16 = 32$ Blasen der Stufenzahl 0.010 zulässig.

Hausnorm bei LASER COMPONENTS

Das verwendete Standard-BK7 Material in der Normalqualität besitzt die sehr guten Werte von $1/3 \times 0.025$.

The correct specification according to DIN ISO 10110 is demonstrated by the example $1/3 \times 0.16$. The first digit indicates the type of specification. A „1“ stands for bubbles and inclusions. Accordingly, a bubble specification is introduced in our example. „ 3×0.16 “ means that not more than 3 bubbles with a maximum size of 0.16 are permitted. These are so-called preferential values.

The following table states the separation factors for bubbles and inclusions.

Calculation of the Substrate Quality

If the sum of the projected areas of the bubbles and inclusions is smaller than the maximum total area $N \times A^2$, it is possible to state a higher number of bubbles and/or inclusions that have a smaller size via the table.

The declaration of the inclusions according to DIN 10110 always states the values with the largest size. The bubbles and/or inclusions, however, can occur in higher numbers - but smaller sizes - in the specified substrates. This is calculated as follows.

Example:

The specification $1/2 \times 0.040$ means that a maximum of two bubbles (N) of size 0.040 (A) can occur. A look at the preferential values listed in the first column of the table shows the desired size in mm. The multiplication column „2.5“ to the right of the preferential values depicts the size 0.025. Accordingly nearly $2 \times 2.5 = 5$ bubbles and/or inclusions have the size 0.025. Following this principle, more values up to the multiplication factor 16 can be calculated. For the given substrate nearly $2 \times 16 = 32$ bubbles of size 0.010 are also permissible.

House Norm at LASER COMPONENTS

The standard BK7 material of normal quality possesses the exceptional values $1/3 \times 0.025$.

Inhomogenitäts- und Schlierenklassen

Mit der neuen Norm DIN ISO 10110 wurden die Definitionen der Schlierenklassen geändert und um den Begriff der „Inhomogenitätsklassen“ erweitert.

Die Formulierung der Spezifikation lautet nun „2/A;B“. Die erste Ziffer stellt die Codenummer für Inhomogenität und Schlieren dar. „A“ definiert die Inhomogenitätsklasse und „B“ die Schlierenklasse.

2/A;B 2: Codenummer für Inhomogenität und Schlieren
A: Inhomogenitätsklasse
B: Schlierenklasse

Inhomogenität

Eine durch Abweichung der chemischen Zusammensetzung im Material verursachte Änderung der Brechzahl im optischen Bauteil wird Inhomogenität genannt.

Die zulässige Brechzahlabweichung im optischen Bauteil wird über sechs Inhomogenitätsklassen angegeben.

Inhomogeneity Classes	Maximum Permissible Deviation in the Refractive Index of the Component 10 ⁻⁶
0	± 50
1	± 20
2	± 5
3	± 2
4	± 1
5	± 0.5

Schlieren

Schlieren hingegen sind als Inhomogenitäten kleiner räumlicher Ausdehnung definiert, die in Form von scharf begrenzten fadenförmigen Bereichen auftreten können.

Die Spezifikation der Schlierenklasse dient nicht nur der Auswahl des Rohmaterials, sondern erlaubt auch die Prüfung, inwieweit das Fertigteil den Spezifikationen entspricht.

Die Klassen 1 bis 4 berücksichtigen Schlieren, die eine optische Wegdifferenz von mindestens 30 nm verursachen. Klasse 5 wird für Bauteile angewendet, die allerhöchsten Qualitätsansprüchen genügen; die optische Wegdifferenz hierbei ist wesentlich kleiner als 1 %.

Inhomogeneity and Striae Classes

The definition of striae classes was changed in the new DIN ISO 10110 norm and expanded by the term “inhomogeneity classes.”

The nomenclature of the specification now reads “2/A;B“. The first digit is the code number for inhomogeneity and striae. “A” denotes the inhomogeneity class and “B” the striae class.

2/A;B 2: Code number for inhomogeneity and striae
A: Inhomogeneity class
B: Striae class

Inhomogeneity

A change in the refractive index of the optical component caused by a change in the chemical makeup of the material is called inhomogeneity.

The permissible deviation in the refractive index of an optical component is divided into six inhomogeneity classes.

Striae

Striae are defined as spatially short-range variations of homogeneity which occur as well-defined thread-like inclusions.

The specification of the striae class not only serves the selection of raw material but also allows examination as to whether the final part matches the specifications.

Classes 1 to 4 regard striae, which vary the optical path by at least 30 nm. Class 5 is used for components that satisfy the highest quality expectations. Here the difference in the optical path is significantly lower than 1 %.

Striae Classes	Striae Density Which Varies the Optical Path by at Least 30 nm [%]
1	10
2	5
3	2
4	1
5	Extremely high absence of striae; the limitation to striae exceeding 30 nm is obsolete

Hausnorm bei LASER COMPONENTS

Die Hausnorm für BK7 und Quarzglas beträgt 2/5;5.

House Norm at LASER COMPONENTS

The house norm for BK7 and fused silica is 2/5;5.

Passfehler (Oberflächenformtoleranz)

Der Passfehler wird auch Oberflächenformabweichung genannt. Darunter wird im Allgemeinen der Abstand zwischen der zu prüfenden optischen Oberfläche – der sog. Prüffläche – und der theoretischen Sollfläche verstanden. Der Passfehler berechnet sich aus den folgenden Funktionen:

Peak-to-Valley-Differenz

Die Differenz zwischen maximalem Abstand $a_{\max}$ und minimalem Abstand $a_{\min}$ zwischen den Flächen wird als Peak-to-Valley-Differenz (PV-Differenz) bezeichnet.

Gesamtpassfehler-Funktion

Die theoretische Fläche, die als Differenz von Ist-Oberfläche und der gewünschten Soll-Oberfläche festgelegt ist, wird als Gesamtpassfehler-Funktion bezeichnet.

Bestangepasste Kugelfläche

Aus der Gesamtpassfehler-Funktion ergibt sich die so genannte bestangepasste Kugelfläche. Die bestangepasste Kugelfunktion gibt Auskunft über diejenige Kugelfläche, für die der rms-Wert der Differenz von Kugelfläche und Gesamtpassfehlerfunktion minimal wird (rms: root mean square).

Unregelmäßigkeitsfunktion

Unter dem Begriff Unregelmäßigkeitsfunktion wird der Unterschied zwischen der Gesamtpassfehlerfunktion und der bestangepassten Kugelfläche aufgefasst.

Surface Figure Error (Surface form tolerance)

The surface figure error is also called surface deviation. It denotes a mismatch between the actual and the ideal surface. The surface figure error is calculated from the following formulas:

Peak-to-Valley Difference

The difference between the maximum distance $a_{\max}$ and the minimum distance $a_{\min}$ between the surfaces is called the peak-to-valley difference (PV difference).

Total Surface Figure Error Function

The theoretical surface which is defined by the difference between the actual surface and the ideal surface is called total surface figure error function.

Best Fit Sphere

The so-called best fit sphere is derived from the total surface figure error function. The best fit sphere function describes the sphere for which the rms value of the difference between the sphere and the total surface figure error function is minimized (rms: root mean square).

Irregularity Function

Irregularity function denotes the difference between the total surface figure error function and the best fit sphere.

Bestimmung des Passfehlers

Zur Bestimmung des Passfehlers wird die zu prüfende Oberfläche mit einem hochpräzisen Referenzglas verglichen. Aus dem Unterschied zwischen der Prüffläche und der Projektion der Referenzwellenfront (Referenzfläche) resultieren Interferenzstreifen.

Toleranzen der Passfehler

Sollen Toleranzen des Passfehlers bestimmt werden, so ist eine Zerlegung des gemessenen Passfehlers in verschiedene Passfehlertypen notwendig. Für sphärische Flächen handelt es sich um

- **Pfeilhöhenfehler**
Der Pfeilhöhenfehler entspricht der Peak-to-Valley-Differenz zwischen einer bestangepassten Kugelfläche und einer Ebene.
- **Unregelmäßigkeit**
Der Begriff Unregelmäßigkeit ist als Peak-to-Valley-Differenz zwischen der Unregelmäßigkeitsfunktion und der ihr am besten angepassten Ebene definiert.

Alle maximal zugelassenen Werte der genannten Passfehlertypen sind in der Einheit Interferenzstreifen anzugeben. Für Passfehlerangaben wird die grüne Quecksilberlinie (e-Linie) mit $\lambda = 546.07 \text{ nm}$ als Bezugswellenlänge verwendet.

Die nach DIN ISO 10110 gebräuchliche Schreibform lautet „3/A (B)“. Passfehler werden über die erste Ziffer „3“ spezifiziert. „A“ gibt den maximal erlaubten Pfeilhöhenfehler (Einheit in Interferenzstreifen) und „B“ die maximal erlaubte Unregelmäßigkeit wieder.

3/A (B/C) 3: Codenummer für Passfehler
A: erlaubte Pfeilhöhenabweichung
B: maximal erlaubte Unregelmäßigkeit (Abweichung von Kugelform)
C: Feinpassfehler (rotationssymmetrische Unregelmäßigkeiten)

Beispiel:

Die Angabe 3/0.5 (0.25/–) besagt Folgendes:
Fehlertyp: 3 Passfehler
Pfeilhöhenfehler: 0.5 Interferenzstreifen ($\lambda/4$)
Unregelmäßigkeit: < 0.25 Interferenzstreifen ($\lambda/8$)
Feinpassfehler: keine Spezifikation

A wird in der Hausnorm für sphärische Flächen nicht angegeben, die max. erlaubte Abweichung erfolgt über die Toleranz des Krümmungsradius (typ. mit $\pm 0.5\%$)

Determination of the Surface Figure Error

In order to determine the surface figure error the surface to be examined is compared to a high precision reference glass. Interference fringes result from the difference between the test surface and the projection of the reference wavefront (reference surface).

Tolerances of the Surface Figure Error

If tolerances of the surface figure error are to be determined it is necessary to separate the measured surface figure error into different error types. These are for spherical surfaces

- **Sagitta Error**
The sagitta error is the peak-to-valley difference between a best fit sphere and a surface.
- **Irregularity**
Irregularities are defined as the peak-to-valley difference between the irregularities function and its best fit surface.

All maximum allowable values of the mentioned error types have to be stated in units of interference fringes. The green mercury line (e line) with $\lambda = 546.07 \text{ nm}$ is used as a reference wavelength for declarations of the surface figure error.

The nomenclature according to DIN ISO 10110 is "3/A (B).". The first digit "3" indicates surface figure errors. "A" denotes the maximum permissible sagitta error (in units of interference fringes) and "B" the maximum permissible irregularity.

3/A (B/C) 3: Code number for Surface figure error
A: Maximum permissible sagitta deviation
B: Maximum permissible irregularity (deviation from sphere)
C: Fine surface figure error (rotational symmetry irregularities)

Example:

The declaration 3/0.5 (0.25/–) refers to the following:
Error type: 3 Surface figure errors
Sagitta error: 0.5 interference fringe ($\lambda/4$)
Irregularity: < 0.25 interference fringe ($\lambda/8$)
Fine surface figure error: no specification

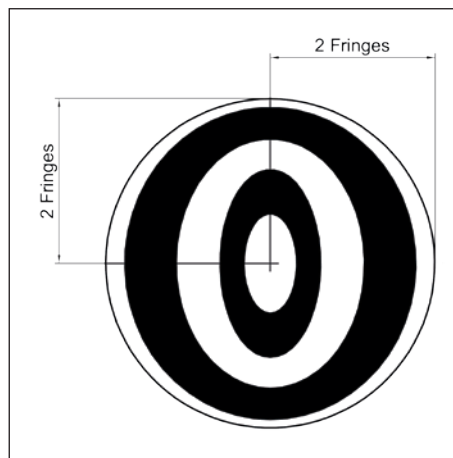
In the in-house norm for spherical surfaces A is not specified on a standard basis. The maximum permissible deviation is given as tolerance of the radius of curvature (typically $\pm 0.5\%$)

Interferometrische Bestimmung der Fehler

Die interferometrische Bestimmung von Pfeilhöhenfehler und Unregelmäßigkeit erfolgt sowohl ohne als auch mit Kippung der Prüffläche.

Ohne Kippung wird auf grobe Passfehler überprüft. Hierbei erzeugt der Pfeilhöhenfehler ein Interferenzmuster, das aus kreisförmigen Streifen besteht. Asymmetrische Anomalitäten können über elliptische oder gar hyperbolisch verzerrte Kreise erkannt werden.

Für die Anteilsbestimmung von Pfeilhöhenfehlern und Unregelmäßigkeit bei einem Interferenzmuster werden maximale (m) bzw. minimale (m') Streifenzahlen längs zweier Richtungen abgezählt. Im Falle von elliptischen Streifen ergibt sich der Pfeilhöhenfehler zu $(m + m')/2$ und die Unregelmäßigkeit zu $|m - m'|$.

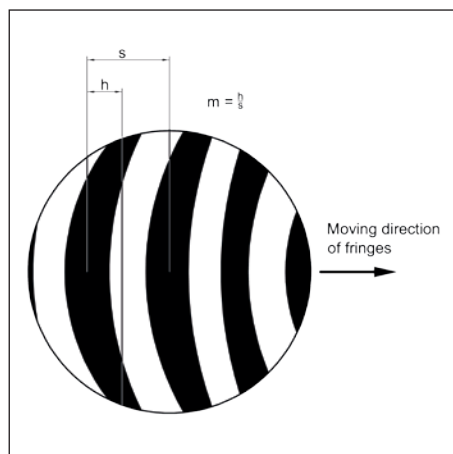


Test surface with sagitta error and irregularities of 2 fringes each.

Mittels Verkipfung werden die hauptsächlich vorkommenden kleinen Passfehler gemessen. Der Quotient der Durchbiegung h des Streifens und der Streifenbreite s ist dabei Gegenstand der Untersuchung.

Der Abstand zweier gleichfarbiger Streifen entspricht einem Wegunterschied Δs von einer Wellenlänge $\Delta s = \lambda$. Bei einer Passe-Anforderung von $\lambda/4$ darf das Verhältnis m der Durchbiegung h zum Streifenabstand s nicht größer als 1:4 sein.

In dem vorhergehenden Beispiel wird also vorausgesetzt, dass das Substrat die Passe 3/0.5 erfüllt.



The mainly occurring small surface figure errors are measured via tilting. Scope of the measurement is the quotient of the fringe bending h and the fringe width s .

The distance between two fringes of the same color corresponds to a path difference Δs of a wavelength $\Delta s = \lambda$. For a surface figure requirement of $\lambda/4$ the ratio m between the bending h and the fringe spacing s must not be bigger than 1:4.

In the example above it is assumed that the substrate meets a surface figure requirement of 3/0.5.

Mittels Verschiebung der Prüffläche hin zur Referenzfläche kann der Feinoptiker feststellen, ob die Substrate eine konvexe oder konkave Form aufweisen. Gehen die Streifen mit der größten Krümmung vom Mittelpunkt weg, so ist die Prüffläche konvex (vgl. Abb.). Bewegen sie sich hingegen zum Mittelpunkt hin, so weist die Prüffläche eine konkave Form auf.

By moving the test surface towards the reference surface the precision optician can determine whether the substrates features a concave or a convex form. If the fringes with the large curvature move away from the center, the test surface is convex (see figure). If, on the other hand, they move towards the center, the test surface possesses a concave shape.

Anwendungen und Anforderungen

Für Optiken, die im Resonator eines Lasers verwendet werden, muss eine Passe von $\lambda/10$ sphärisch erfüllt sein. Um dies zu erreichen, darf ein bestimmtes Verhältnis von Durchmesser zu Dicke nicht überschritten werden.

Applications and Requirements

Optics that are used inside the resonator of a laser must have a spherical surface figure of $\lambda/10$. To achieve this, a certain ratio between diameter and thickness must not exceed.

Substrate	Diameter / Thickness
BK7	$\leq 5 : 1$
Fused Silica	$\leq 10 : 1$

Diese Faustregel bewahrt die Konstruktion vor zu dünnen Substraten, die entweder bereits bei der Beschichtung oder beim Einbau deformiert werden. Dünnere Substrate können nur im angespannten Zustand eine $\lambda/10$ Passe erreichen.

Ausschließlich bei Anwendungen in Transmission, wie bei Fenstern, können dünnere Substrate problemlos eingesetzt werden. Dies ist möglich, da sich die Pfeilhöhenfehler der Eintritts- und Austrittsfläche in gleiche Richtung bewegen und der transmittierte Wellenfrontfehler dadurch geringer ausfällt.

Hausnorm bei LASER COMPONENTS

Die Hausnorm für BK7 und Quarzglas beträgt bezogen auf ein planes 1" Substrat 3/0.2 (0.1).

This rule of thumb saves the setup from substrates that are too thin and thereby becoming deformed during coating or assembly. Thinner substrates can reach a surface figure of $\lambda/10$ only if they are optically contacted.

Using thinner substrates without any problems is only possible for applications in transmission, such as windows. This is possible because the sagitta errors of both the entrance and exit surface work in the same direction, reducing the transmitted wavefront error.

House Norm at LASER COMPONENTS

With regard to a flat 1" substrate the house norm for BK7 and fused silica is 3/0.2 (0.1).

Zentriergenauigkeit

Der Zentriergenauigkeit bei rotationssymmetrischen Optiksyste-men mit sphärischen und asphärischen Flächen liegt die DIN ISO 10110-6 zugrunde. Hier sind die Angaben über Zentriertoleranzen von optischen Elementen und Systemen festgehalten. Der Spezifikation wird die Kennziffer „4“ zugeordnet.

Werden einzelne sphärische Flächen betrachtet, so besteht der Zentrierfehler aus dem Kippwinkel der Fläche. Unter dem Kippwinkel wird derjenige Winkel verstanden, der zwischen Bezugsachse und der Flächennormalen aufgespannt ist.

Die Angabe für den Zentrierfehler bei sphärischen Flächen muss die Form „4/ σ “ annehmen, wobei σ den maximal zulässigen Wert des Kippwinkels angibt.

Bei einzelnen asphärischen Flächen ist neben σ auch der seitliche Versatz (L) anzugeben. Dieser legt den Abstand des Scheitelpunkts der asphärischen Fläche zur Bezugsachse fest. Die Angabe für asphärische Flächen muss 4/ σ (L) lauten.

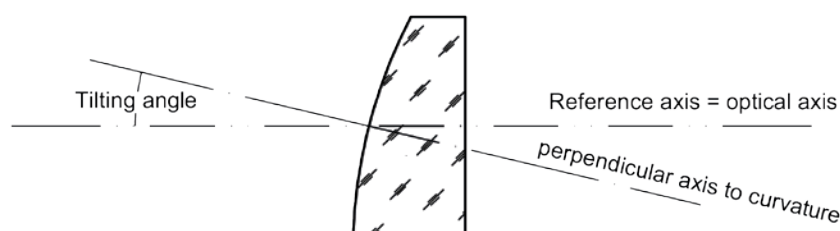
Centering Accuracy

DIN ISO 10110-6 is the basis for the centering accuracy of rotationally symmetric optical systems containing spherical and aspherical surfaces. In there, specifications of centering tolerances for optical elements and systems are described. The digit "4" is assigned to this specification.

If individual spherical surfaces are considered, the centering error equals the wedge angle of the surface, where the wedge angle denotes the angle between the reference axis and the surface normal.

The specification of the centering error of spherical surfaces must follow the nomenclature "4/ σ " where σ denotes the maximum permissible wedge angle.

In addition to σ the lateral offset (L) has to be stated as well for single aspherical surfaces. The lateral offset denotes the distance from the vertex of the aspherical surface to the reference axis. The specification of an aspherical surface must be 4/ σ (L).



Sind bestimmte optische Gruppen miteinander verkittet, so wird eine Toleranz für den Keilwinkel der Kittschicht angegeben: Schreibweise 4/ $\Delta\tau$.

Einzellinse

4/ σ (L) 4: Codenummer für Zentriergenauigkeit
 σ : maximal erlaubter Kippwinkel
 L: seitlicher Versatz (bei Asphären)

Single Lens

4/ σ (L) 4: Code number for centering accuracy
 σ : Maximum permissible wedge angle
 L: Lateral offset (for aspheres)

Gekittete Linsen

4/ $\Delta\tau$ 4: Codenummer für Zentriergenauigkeit
 $\Delta\tau$: Toleranz für Keilwinkel der Kittschicht

Cemented Lens

4/ $\Delta\tau$ 4: Code number for centering accuracy
 $\Delta\tau$: Wedge angle tolerance of the cement layer

Oberflächenfehler

Oberflächenfehler sind Fehler innerhalb einer optischen Fläche, die durch den Herstellungsprozess entstehen oder durch unsachgemäße Behandlung verursacht werden.

Folgende Fehler fallen darunter:

- Kratzer / Wischer
- Löcher
- Haarrisse
- Polierpickel

Die Spezifikation wird nach DIN ISO 10110-7 durchgeführt. Die gebräuchliche Schreibform lautet „5/N x A“. Oberflächenfehler werden über die erste Ziffer „5“ gekennzeichnet. „N“ steht für die Anzahl der erlaubten Oberflächenfehler mit maximal zulässiger Größe, „A“ für die Stufenzahl.

5/N x A 5: Codenummer für Oberflächenfehler
N: Anzahl der erlaubten Fehler mit maximal zulässiger Größe
A: Stufenzahl [mm]

Hausnorm bei LASER COMPONENTS

Die Hausnorm beträgt bezogen auf ein 1" Durchmesser unbeschichtetes Substrat 5/4 x 0.025. Die maximale Gesamtoberfläche ist damit definiert und wird nicht überschritten. Die Anzahl N der Fehler variiert mit der Stufenzahl A. Wird A reduziert, so wird sich die Anzahl der Fehler erhöhen. 5/10 x 0.016 würde somit ebenfalls der Hausnorm entsprechen.

Weitere Fehler

Kommen neben dem Oberflächenfehler weitere Fehler hinzu, so lässt sich dies aus der erweiterten Spezifikation erkennen.

Belagfehler 5/N x A, CN' x A'
C: engl. Coat – Belagfehler
N': Anzahl der erlaubten Fehler mit maximal zulässiger Größe
A': Stufenzahl (bezogen auf Belagfehler)
Kratzer 5/N x A; LN" x A"
L: Kratzer beliebiger Länge
N": Anzahl der erlaubten Fehler mit maximal zulässiger Größe
A": Stufenzahl (bezogen auf Kratzer)
Randaussprünge 5/N x A; EA'''
A''': maximal erlaubte Ausdehnung der Aussprünge vom physikalischen Rand der Oberfläche

Vollständige Schreibweise des Oberflächenfehlers
5/N x A; CN' x A'; LN" x A"; EA'''

Surface Quality

The surface quality describes errors in an optical surface caused during the manufacturing process or by improper handling.

This includes the following errors:

- Scratches / smears
- Holes
- Hair cracks
- Polishing pimples

The specification is performed according to DIN ISO 10110-7. The most common nomenclature is "5/N x A". The first digit "5" indicates the surface quality whereas "N" denotes the number of permissible surface imperfections with maximum size "A".

5/N x A 5: Code number for surface quality
N: Number of permissible surface imperfections with maximum size
A: Maximum permissible size [mm]

House Norm at LASER COMPONENTS

With regard to a 1" diameter uncoated substrate the house norm is 5/4 x 0.025. With this, the maximum total area of imperfections is defined and not exceeded. The number of imperfections N varies with size A. If A is reduced, the number of imperfections increases. Therefore, 5/10 x 0.016 would also fulfill the house norm.

Additional Errors

If more errors occur, that is in addition to surface imperfections, they can be recognized by the extended specification.

Coating imperfections 5/N x A, CN' x A'
C: Coating quality
N': Number of permissible quality with maximum permissible size
Scratches A': Size (regarding coating quality)
5/N x A; LN" x A"
L: Scratches of arbitrary length
N": Number of permissible scratches with maximum permissible size
A": Size (regarding scratches)
Edge chips 5/N x A; EA'''
A''': Maximum permissible chip size from the physical edge of the surface

Complete nomenclature of the surface quality
5/N x A; CN' x A'; LN" x A"; EA'''

Bestimmung des Oberflächenfehlers

Zur Überprüfung eines Werkstücks auf Oberflächenfehler wird Licht auf den Prüfling eingestrahlt. Die Oberflächenfehler bewirken eine Streuung des Lichts. Die Streuung wird mit der Hintergrundbeleuchtung verglichen. Die Größe der Oberflächenfehler wird in der Praxis mit einer Referenzschablone bestimmt.

Apparativ kann der Prüfling sowohl mittels Transmissionsmessung als auch Reflexionsmessung untersucht werden.

Auf optischen Flächen, die bei der Hochleistungsoptik eingesetzt werden, sind durchgehende Kratzer unzulässig. Bei der Qualitätskontrolle der Substrate ist daher größtmögliche Sorgfalt notwendig.

Bei den Optiken werden keine Untersuchungen mit dem Mikroskop durchgeführt. Fehler, die ausschließlich mit dem Mikroskop erkennbar sind, haben erfahrungsgemäß keinen Einfluss auf Zerstörschwellen und die Qualität des Laserstrahls.

Zur Bestimmung der Oberflächenfehler liegt eine Größenvergleichsplatte vor.

Determination of Surface Quality

In order to inspect a part for surface quality light is shone on the sample. Surface imperfections will cause the light to scatter. This scattering is compared to the background illumination. In practice, the size of the surface imperfections is determined with a comparison chart.

When using measurement devices the sample can be inspected via both transmission and reflection measurement.

Optical surfaces which are used for high power optics cannot have any traversing scratches. The utmost care is therefore required during quality inspection of substrates.

The substrates are not examined using a microscope. It can be said from experience that errors which can only be recognized under a microscope do not have any influence on the damage threshold and the quality of the laser beam.

To determine surface imperfections a template for size comparison is available.

Oberflächengüte

Die Oberflächengüte ist ein globales statistisches Merkmal bezogen auf das Rauheitsprofil einer optischen Oberfläche. Charakteristik und Struktur sind dabei an jeder Stelle der Prüflfläche gleich. Es wird in matte und spiegelnde Oberflächen separiert. Auf einer spiegelnden Oberfläche können zudem Unregelmäßigkeiten in Form von Mikrodefekten auftreten.

Surface Finish

The surface finish is a global, statistical characteristic pertaining to the roughness profile of an optical surface. The characteristics and structure are the same at every location of the test surface. There are matt and reflective surfaces. For reflective surfaces irregularities in the form of micro defects can occur.

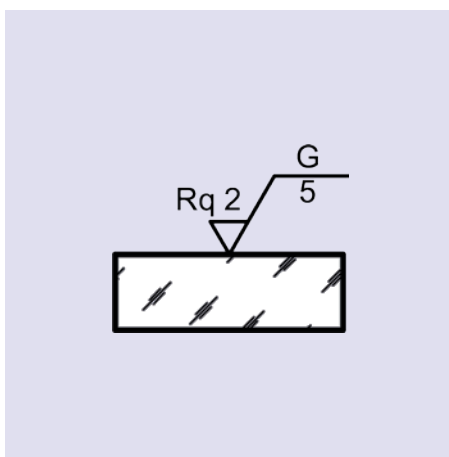
Matte Oberflächen

Matte Oberflächen zeichnen sich durch eine Höhendifferenz aus, die sich nicht wesentlich von der Wellenlänge des sichtbaren Lichts unterscheidet.

Sie werden über den quadratischen Mittenrauhwert R_q [μm] beschrieben. Dieser ist definiert als quadratischer Mittelwert der absoluten Beträge der Abstände des Rauheitsprofils vom Median innerhalb der Messstrecke. R_q ist somit abhängig von der Abtaststrecke; wenigstens die unterste Abtastlängengrenze muss damit bei der Messung angegeben werden.

Die nebenstehende Abbildung zeigt die korrekte Schreibweise der Oberflächengüte-Spezifikation bei matten Oberflächen.

Die Ziffer neben „ R_q “ gibt den maximal zulässigen Mittenrauhwert in μm an. Aus dem Buchstaben „G“ ist ersichtlich, dass es sich um eine geschliffene Fläche handelt. Die Ziffer „5“ unterhalb des „G“ gibt die Mindestabtastlänge (5 mm) für die Bestimmung von R_q an.



Fine Grind Surfaces (matt)

Fine grind surfaces are characterized by a difference in height that does not significantly differ from the wavelength of visible light.

They are described using the quadratic average roughness R_q [μm]. It is defined as the quadratic average of the absolute values of the distances between the roughness profile and the median within the measured section. Hence, R_q is dependent on the measuring length. At the very least, the lower boundary of the measuring length has to be given for the measurement.

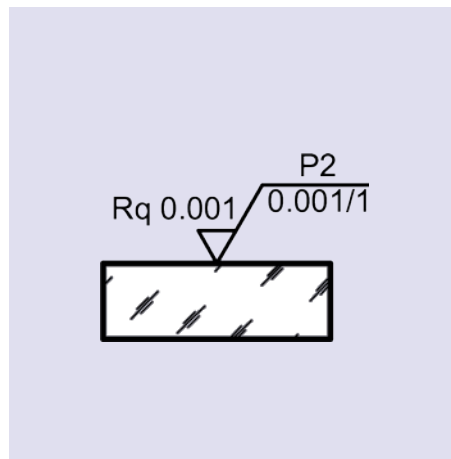
The following figure shows the correct nomenclature of the surface finish specification for matt surfaces.

The number next to „ R_q “ is the maximum permissible average roughness in μm . The letter „G“ signifies a grinded surface. The digit „5“ below the G is the minimum measuring length (5 mm) necessary to determine R_q .

Spiegelnde Oberflächen

Bei spiegelnden Oberflächen ist die Höhendifferenz weitaus geringer als bei matten Oberflächen. Zur Messung der Fehler stehen bei spiegelnden Oberflächen drei Möglichkeiten zur Verfügung.

- **Mittenrauhwert Rq**
In den meisten Fällen ist die Angabe des Mittenrauhwertes Rq ausreichend.
- **Mechanische Abtastung**
Mikrodefekte werden über ein mechanisches Profilometer detektiert. Entscheidend ist dabei, wie oft die Abtastnadel des Profilometers deutlich von der ansonsten glatten Oberfläche abweicht.
- **PSD-Funktion**
Bei feinstpolierten Oberflächen, die höchste Anforderungen erfüllen müssen, wird das Spektrum der Raumfrequenzen der Oberflächenrauheit untersucht.



Reflective surface with a maximum of 80 micro-defects per 10 mm measuring length and surface roughness $R_q \leq 0.001 \mu\text{m}$ at a measuring length between 0.001 mm and 1 mm.

Reflective Surfaces

The difference in height is far less for reflective surfaces than for matt surfaces. There are three ways to measure the error of reflective surfaces.

- **Average Roughness Rq**
In most cases stating the average roughness Rq is sufficient.
- **Mechanical Scanning**
Microdefects are detected using a mechanical profilometer. It is crucial how often the profilometer needle deviates from the otherwise smooth surface.
- **PSD Function**
For the finest polished surfaces, which have to live up to the highest expectations, the spectrum of spatial frequencies of the surface roughness is examined.

Für die Darstellung einer spiegelnden Oberfläche ohne quantitative Angaben wird in der Darstellung lediglich der Buchstabe „P“ verwendet. P steht dabei für poliert.

Die maximal zulässige Anzahl an Mikrodefekten mit Ausdehnungen $< 1 \mu\text{m}$ für die jeweilige Stufenzahl wird über den Poliergrad P1 - P4 festgelegt. Folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen Poliergrad und Mikrodefekten.

To denote a reflective surface without any quantitative statements the letter "P" is simply used. P stands for polished.

The maximum permissible number of micro-defects with a size of $< 1 \mu\text{m}$ is determined for each size by the polishing grade P1 - P4. The following table shows the correlation between polishing grade and micro-defects.

Polishing Grade	Number N of Microdefects per 10 mm of Measuring Length
P1	$80 \leq N \leq 400$
P2	$16 \leq N \leq 80$
P3	$3 \leq N \leq 16$
P4	$N < 3$

Zusätzlich zum Mittenrauhwert Rq kann ein bestimmter Abtastlängenbereich festgelegt werden. Die Angabe erfolgt analog der Abbildung der matten Oberflächen, der Abtastlängenbereich von Rq (Schreibweise x mm / y mm) wird unterhalb des Poliergrades angegeben (vgl. Abb.).

In addition to the average roughness Rq a certain measuring length range can be set. The statement follows the example of matt surfaces. The measuring length range of Rq (nomenclature x mm / y mm) is stated below the polishing grade (see figure).

Hausnorm bei LASER COMPONENTS

Die Hausnorm beträgt Poliergrad P4.

House Norm at LASER COMPONENTS

The house norm is polishing grade P4.

Kennzeichnung von Beschichtungen

Bei wenigen Spezifikationsparametern werden die Leistungsanforderungen einer Beschichtung direkt in der Zeichnung angegeben.

Folgende Symbolik wird verwendet:

- τ : Durchlässigkeit von Strahlungsflüssen
- ρ : Reflexion von Strahlungsflüssen
- α : Absorption von Strahlungsflüssen
- λ : optisch beschichtete Oberflächen

Die Beschreibung der optischen Charakteristik ist in einem Rechteck ausgeführt (vgl. Abb.).

Befinden sich Funktionsschichten auf Kittflächen, so ist anzugeben, ob die Spezifikation vor oder nach dem Verkitten gilt.

Bei Schutzüberzügen wird eine breite Strich-Punkt-Strich Linie (nach ISO 128) neben der Teilkontur liegend angegeben.

Labelling of Coatings

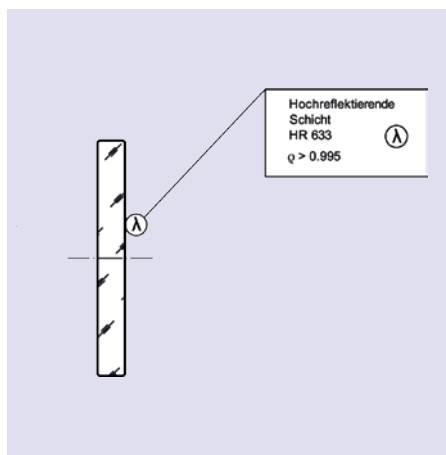
The performance requirements of a coating are stated only for a few parameters directly in the drawing.

The following symbols are used:

- τ : Permeance of radiant fluxes
- ρ : Reflection of radiant fluxes
- α : Absorption of radiant fluxes
- λ : Optically coated surfaces

The description of the optical characteristic is done in a box (see figure). If functional coatings are applied to cement layers it has to be stated whether the specification applies before or after cementing.

For protective layers a broad dash-dot-dash line (according to ISO 128) is drawn next to the outlined part.



Example of specifying optically coated surfaces.

Praktisches Beispiel

Nach Einführung in die theoretischen Grundlagen zur Spezifizierung von Laseroptiken wird eine plankonvexe AR-Linse nach DIN ISO 10110 ausführlich erörtert. Bitte beachten Sie hierzu die Zeichnung auf der Seite 55.

Technische Zeichnung

Das hervorstechende Element der Spezifikation in der Zeichnung ist die Maßzeichnung. Die Linse ist einmal im Maßstab 1:1 und um den Faktor 4 vergrößert dargestellt.

Mittendicke und Durchmesser

Als oberstes Maß erscheint die Randdicke von 2.49 mm. Da der Wert in Klammern gesetzt ist, bedeutet dies, dass Maß und Toleranz bereits aus anderen Maßangaben hervorgehen. In diesem Fall aus der unter der Linse vermerkten Mittendicke von 4.9 ± 0.2 mm und dem Krümmungsradius.

Concrete Example

After an introduction to the theoretical principles of specifying laser optics a plano-convex AR lens is discussed in detail according to DIN ISO 10110. Please note also the drawing on page 55.

Technical Drawing

The noticeable element of the specification in the drawing is the scale drawing. The lens is drawn to a scale of 1:1 and again magnified by a factor of 4.

Center Thickness and Diameter

The measurement on top is the edge thickness of 2.49 mm. The value is closed off by parentheses; this means that size and tolerance are determined using other dimensions. In this case, they are determined by the center thickness of 4.9 ± 0.2 mm (stated below the lens) and the radius of curvature.

Der Durchmesser ist auf der planen Seite der Linse angegeben. Er beträgt demnach 15 mm mit einem Kleinstmaß von 14.8 mm.

Generell werden Mittendicke und Durchmesser immer mit Toleranzen angegeben.

Oberfläche

In der Zeichnung ist die Oberflächengüte mit „P4“ symbolisiert. Aus Tabelle von Seite 52 ist ersichtlich, dass die polierte Oberfläche weniger als 3 Mikrodefekten pro 10 mm Abtastlänge aufweisen muss.

Beschichtung

Spezifikationen bezüglich den AR-Schichten sind im Kästchen rechts unten neben der Zeichnung vorzufinden. Demnach darf Licht der Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm maximal zu 0.2 % pro Fläche reflektiert werden.

An dieser Stelle müsste ein eventuell gewünschter Einfallswinkel vermerkt werden, wenn er sich von 0° unterscheiden soll. Eine fehlende Angabe wird immer als 0° interpretiert. Unter diesen Angaben werden gegebenenfalls die Anforderungen für Wisch- und Kratzfestigkeit nach MIL-Normen angegeben.

MIL-48497A gibt Richtlinien an, wie Substrate auf ihre Abriebsfestigkeit zu prüfen sind. Zum Beispiel können Abriebstests mit Radiergummi durchgeführt werden. Zusätzlich enthält die MIL-675-C Auskünfte über Verfahren, Optiken auf Haftfestigkeit und Feuchtigkeitsbeständigkeit zu untersuchen.

Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften des Glases sind rechts und links eingerahmt von den entsprechenden Substratangaben bzgl. Krümmungsradius, Prüfbereich und Oberflächengenauigkeit.

Die linke Spalte („linke Fläche“) stellt in der ersten Zeile den Krümmungsradius der Linsenoberfläche mit dem Zeichen „ ∞ “ dar, was eine plane Oberfläche charakterisiert.

Bei der „rechten Fläche“ ist der Krümmungsradius mit $R = 12.91$ mm CX (für konvex) mit Toleranz angegeben.

Der Prüfbereich bzw. optisch wirksame Durchmesser, mit dem Symbol $\varnothing_e$ dargestellt, beträgt bei beiden Seiten der beschichteten Oberfläche 85 %.

Schutzfase

Unter der darauffolgenden Zeile ist eine Angabe über die Schutzfase zu finden, die in beiden Fällen unter 45° 0.2 mm bis 0.4 mm breit sein muss.

Passfehler (Formtreue)

Im Anschluss findet eine Spezifikation der Passfehler (Kennziffer „3“) statt. Der Pfeilhöhenfehler für plane Flächen beträgt 0.2 Interferenzringe ($= \lambda/10$). (0.2) gibt die maximal erlaubte Unregelmäßigkeit zu 0.2 Interferenzringen ($= \lambda/10$) an.

The diameter is given on the plane side of the lens and measures 15 mm with a minimum size of 14.8 mm.

Generally, center thickness and diameter are stated with tolerances.

Surface

In the drawing the surface quality is symbolized by “P4”. It follows from the table on page 52 that the polished surface must have less than three microdefects per 10 mm of measuring length.

Coating

Specifications regarding the AR layers can be found in the box on the lower right next to the drawing. According to these specifications the reflection per surface must not exceed 0.2 % for light with a wavelength of $\lambda = 1064$ nm.

At this location a possibly requested angle of incidence has to be stated if it differs from 0° . A missing statement will always be interpreted as 0° . Below these declarations the requirements for wipe and scratch resistance according to MIL specs are given if necessary.

MIL-48497A has guidelines on how substrates are to be tested for abrasion resistance. Such tests can, for example, be performed with an eraser. In addition, MIL-675-C has procedures on how to test optics for their adhesiveness and moisture resistance.

Material Properties

The material properties of the glass are flanked on the left and right by the substrate properties regarding radius of curvature, test range, and surface accuracy.

The left column (“left surface”) states the radius of curvature of the lens surface in the first row with the symbol “ ∞ ”, which denotes a plane surface.

For the “right surface” the radius of curvature is stated as $R = 12.91$ mm CX (for convex) with tolerance.

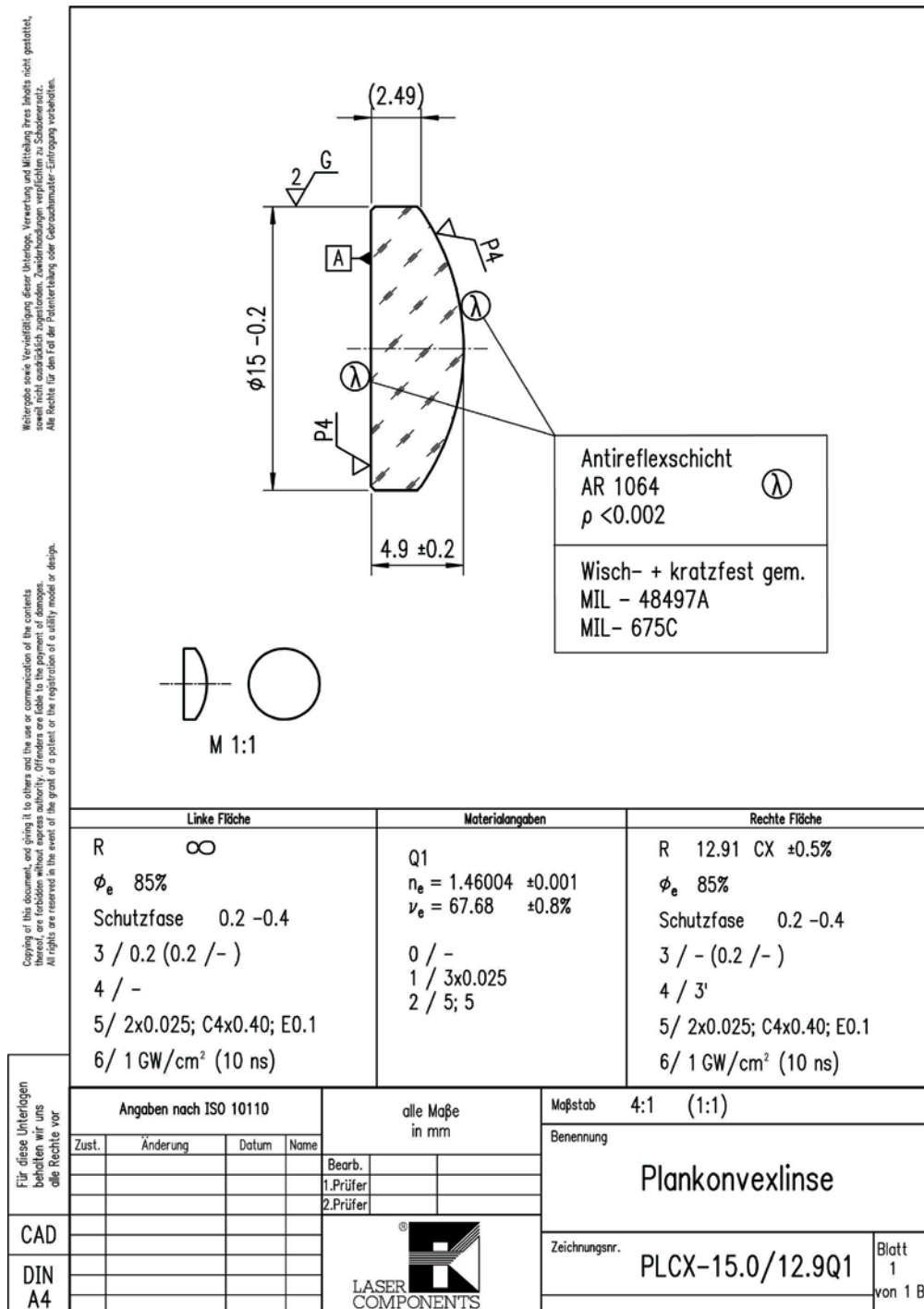
The test range (or optically effective diameter) is denoted by the symbol $\varnothing_e$ and measures 85 % of the coated surface for both sides.

Protective Chamfer

Below the following line a statement regarding the protective chamfer can be found. In both cases its width has to measure between 0.2 mm and 0.4 mm at an angle of 45° .

Surface Figure Error

Afterwards, the surface figure errors (code number “3”) are specified. The sagitta error for a plane surface is 0.2 interference fringes ($= \lambda/10$), while (0.2) denotes the maximum permissible irregularity at 0.2 interference fringes ($= \lambda/1+0$).



Zentriertoleranz

Eine Angabe über die Zentriertoleranz (Kennziffer „4“) wird auf der linken Fläche nicht gemacht, da diese Fläche als Bezugsfläche dient. Zu erkennen ist dies an dem schwarzen Bezugsdreieck mit dem Kästchen „A“. Das Lot, das zur Bezugsfläche gefällt wird (Strich-Punkt-Strich-Linie), dient als Bezugsachse für die Zentriertoleranz der rechten Linsenfläche. Demnach ist für die sphärische Fläche ein maximaler Kippwinkel von drei Bogenminuten zugelassen.

Centering Tolerance

A specification of the centering tolerance (code number “4”) is not given for the left surface since it acts as a reference surface. This can be recognized by the black reference triangle with the box “A”. The reference surface normal (dash-dot-dash line) serves as a reference axis for the centering tolerance of the right lens surface. According to this, the maximum permissible wedge angle for the spherical surface is three arc minutes.

Oberflächenfehler

In der nächsten Zeile werden bei beiden Flächen die Spezifikationen bzgl. den Oberflächenfehlern angegeben. Hierbei steht 2×0.025 für maximal zwei Oberflächenfehler mit maximal zulässiger Fläche bei Stufenzahl 0.025. Der Belagfehler ergibt sich zu maximal vier Fehlern mit maximal zulässiger Fläche bei Stufenzahl 0.40. Die maximal erlaubte Ausdehnung der Aussprünge vom physikalischen Rand wird zu 0.1 mm angegeben.

Zerstörschwelle

Ziffer „6“ gibt die Zerstörschwelle an, die auf 1 GW/cm^2 festgesetzt ist. Das eingeklammerte (10 ns) zeigt, dass die Zerstörschwelle auf gepulsten 10 ns Laserbetrieb bezogen ist.

Rohmaterial

Die erste Zeile der mittleren Spalte gibt an, um welches Rohmaterial es sich handelt. In diesem Fall ist es Quarz „Q1“ (Herstellerbezeichnung). Darauf folgt der Brechungsindex n_e bei der e-Linie des Quecksilbers ($\lambda = 546.07 \text{ nm}$). Dieser beträgt 1.46004 ± 0.001 .

Optische Dispersion

Die optische Dispersion der Linse wird über die Abbe'sche Zahl v_e definiert. Sie beträgt in diesem Beispiel $67.68 \pm 0.8 \%$.

Eine Aussage für die Spannungsdoppelbrechung („0“) wird nicht gemacht. Dafür sagt $1/3 \times 0.025$ aus, dass drei Blasen bei einer maximalen Stufenzahl von 0.025 zulässig sind.

Inhomogenitäten

Die Spezifikation für Inhomogenitäten in Bauteilen liegt bei den verwendeten hochwertigen Materialien in der Regel immer in der höchsten Inhomogenitätsklasse 5. Somit beträgt die maximal zulässige Abweichung der Brechzahl $\pm 0.5 \times 10^{-6}$.

Schlierenklasse

Die letzte Zeile der mittleren Spalte gibt Auskunft über die Schlierenklasse, die in diesem Fall „5“ beträgt. Folglich muss in diesem Bauteil eine extreme Schlierenfreiheit vorliegen. Die Einschränkung für Schlieren $> 30 \text{ nm}$ entfällt.

Weitere Spezifikationen

Manchmal werden vom Anwender auch Daten zur Linsenform wie Hauptebenenlage, Schnittweiten etc. benötigt. Sie werden dann rechts oben auf dem Spezifikationsblatt gesondert aufgelistet.

Surface quality

In the next line the specifications of the surface imperfections are stated for both sides. Here 2×0.025 refers to a maximum of two surface imperfections with a maximum permissible size of 0.025. For coating imperfections a maximum of four imperfections with a maximum permissible size of 0.40 are allowed. The maximum permissible protrusion of edge chips from the physical edge is stated as 0.1 mm.

Damage Threshold

The digit „6“ states the damage threshold as being 1 GW/cm^2 . The value in parentheses, i.e. (10 ns), indicates that the damage threshold refers to pulsed laser operation at 10 ns.

Raw Material

The first row of the middle column indicates the type of raw material. In this case it is quartz „Q1“ (name given by the manufacturer). It is followed by the index of refraction n_e at the e line of mercury ($\lambda = 546.07 \text{ nm}$) which is 1.46004 ± 0.001 .

Optical Dispersion

The optical dispersion of the lens is defined using the Abbe number v_e . In this example it is $67.68 \pm 0.8 \%$.

A statement regarding strain-induced double refraction („0“) is not made. $1/3 \times 0.025$, on the other hand, indicates that three bubbles with a maximum size of 0.025 are permitted.

Inhomogeneities

Because of the use of high quality material, the specification of inhomogeneities in substrates usually falls in the highest inhomogeneity class 5. Therefore the maximum permissible deviation from the refractive index is $\pm 0.5 \times 10^{-6}$.

Striae Class

The last row of the middle column states the striae class which, in this case, is „5“. As a result the substrate has to be extremely free of stria. The limitation of striae $> 30 \text{ nm}$ becomes irrelevant.

Additional Specifications

Sometimes the user also needs data regarding the lens shape such as position of the primary plane, back focal lengths, etc. In this case they are listed separately in the upper right corner of the specification sheet.

Reinigen von Laseroptiken

Cleaning Laser Optics



Tipps zur Reinigung
Reinigungs-Anleitung

58
59

Tips on Cleaning
Cleaning Instructions

58
59

Reinigen von Laseroptiken

Das korrekte Reinigen von Laseroptiken spielt für die Gewährleistung der hohen Qualität eine große Rolle. Besonders beim Umgang mit hohen Laserleistungen muss auf die Sauberkeit des Substrates sehr geachtet werden. Andernfalls könnte der Laserstrahl die Beschichtung und damit die Optik zerstören.

Unseren Erfahrungsschatz beim Säubern von Laseroptiken teilen wir gern mit unseren Kunden. Nachfolgend haben wir Ihnen einige Tipps für den korrekten Umgang zusammengestellt.



Cleaning Laser Optics

The correct cleaning of laser optics plays a major role in ensuring their high quality. The cleanliness of a substrate is very important, particularly when handling high power levels. Otherwise, the laser beam could destroy the coating and with it the optic.

We are happy to share a wealth of experience in the cleaning of laser optics with our customers and have therefore put together a few notes on the correct handling of said optics.

Tipps zur Reinigung

■ Abblasen der Optiken

Größere Staubteilchen oder Sandkörner sollten immer mit einem Blasebalg oder mit Stickstoff abgeblasen werden. Keinesfalls sollten diese weggewischt werden, da hierdurch Kratzer auf dem Substrat entstehen könnten. Beim Abpusten mit Atemluft besteht die Gefahr, dass Speicheltröpfchen auf die Oberfläche gelangen.

■ Handschuhe beim Handling

Beim Handling von Optiken sollten immer Handschuhe getragen werden. Sollten doch einmal Fingerabdrücke auf das Substrat gelangen, so sollten diese unbedingt sofort entfernt werden. In Rückständen, die durch Fingerabdrücke entstehen, befinden sich aggressive Säuren, die mit voranschreitender Zeit immer tiefer in die Oberfläche eindringen. Bereits nach kurzer Zeit können sie daher nicht mehr rückstandsfrei entfernt werden.

■ Keine Reinigung von Metallbeschichtungen

Metallbeschichtungen sollten niemals gereinigt werden. Diese Beschichtungen sind sehr weich. Selbst durch leichtes Abziehen der Optiken können Kratzer in der Beschichtung entstehen.

■ Keine Verwendung von Brillenputztüchern

Brillenputztücher sind nicht geeignet, um Laseroptiken zu reinigen. Häufig enthalten diese Antibeschlag-Substanzen, die sich auf der Optik ablagern und Schichtsysteme schädigen und die Laser-Zerstörschwelle herabsetzen könnten.

Tips on Cleaning

■ Dusting off Optics

Larger dust particles or sand grains should always be cleaned up with a bellows or nitrogen. They should absolutely never be wiped off, as the substrate can become scratched in this way. Blowing a substrate with your mouth can cause miniature droplets of saliva to land on the surface.

■ Wearing Gloves When Handling Optics

When handling optics gloves should be worn at all times. If fingerprints end up on the substrate, they should be removed immediately. The residue left by fingerprints contains aggressive acids that continue to dissolve the surface as time goes on. Even after just a short while, the residue can no longer be removed.

■ Metal Coatings Cannot be Cleaned

Metal coatings should never be cleaned. These coatings are extremely soft. Even lightly wiping the optics can leave scratches in the coating.

■ Cleaning Wipes for Glasses Should not be Used

The cleaning wipes that are used on glasses are not suitable for cleaning laser optics. They often contain de-fogging substances that could leave residues on the optic and harm the coating layers, thereby reducing the laser damage threshold.

Reinigungs-Anleitung

Zum Reinigen werden acetone- oder isopropanol-beständige Reinigungstücher verwendet. Diese werden so gefaltet, dass eine möglichst plane Fläche zum Reinigen entsteht und die Tücher in einer selbstklemmenden Pinzette gehalten werden können. Bitte achten Sie darauf, dass keine Metallteile der Pinzette über das Tuch hinausstehen, damit die zu reinigende Fläche nicht verkratzt wird.

Das Tuch wird nun leicht mit Aceton oder Isopropanol benetzt. Die optimale Menge ist durch Ausprobieren herauszufinden. Zuviel Lösungsmittel führt zu Wischspuren, zuwenig lässt das Tuch schneller fusseln.

Das Substrat wird am Besten von der Mitte beginnend mit kreisenden Bewegungen zum Rand hin gereinigt. Es ist darauf zu achten, dass ein gleichbleibender, nicht zu geringer, Druck mit dem Tuch auf die zu reinigende Fläche ausgeübt wird.

Die Optik sollte über einer Kaltlichtlampe im Durchlichtverfahren gereinigt und anschließend kontrolliert werden.

Sobald das Reinigungstuch zu fusseln beginnt, muss es durch ein neues ersetzt werden.

Beim Umgang mit Reinigungsmitteln müssen die üblichen Sicherheitsbestimmungen beachtet werden. Hierzu gehören bspw. der Einsatz von lösungsmittelfesten Handschuhen, ein gut gelüfteter Raum aber auch die Beachtung der Sicherheitsdatenblätter.

Bei weiteren Fragen zur Reinigung stehen wir Ihnen jederzeit gern zur Verfügung.

Cleaning Instructions

An acetone and isopropanol resistant cloth is used for cleaning. It is folded (1) to create a plane surface for cleaning and (2) so that the cloth can be held with self-closing tweezers. Please be sure that the metal part of the tweezers does not come into contact with the substrate to prevent the surface being cleaned from becoming scratched.

The cloth is lightly moistened with acetone or isopropanol. The optimal amount can be determined by experimenting. Too much solvent can leave streaks and too little makes the cloth become fuzzy too quickly.

The substrate can best be cleaned by starting in the middle and working in circular motions out to the edge. A constant, not too slight pressure should be applied with the cloth to the surface being cleaned.

The optic should be cleaned in transmission over a cold light source and then inspected.

As soon as the cloth begins to become fuzzy, it must be replaced by a new one.

Standard safety requirements should be heeded when handling cleaning agents. This includes, for example, wearing solvent resistant gloves, using a well-ventilated room, and heeding all hazard sheets.

For more information on cleaning, please feel free to contact us at any time.

Hinweis zur Marken-Inhaberschaft

HPFS® ist eingetragenes Markenzeichen der Corning Inc.

Infrasil® und Suprasil® sind eingetragene Markenzeichen der Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG.

Spectrosil® ist eingetragenes Markenzeichen der Compagnie de Saint-Gobain.

Zerodur® und Lithosil® sind eingetragene Markenzeichen der SCHOTT AG.

Notes on the trademark ownership

HPFS® is a registered trademark of Corning Inc.

Infrasil® and Suprasil® are registered trademarks of Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG.

Spectrosil® is a registered trademark of Compagnie de Saint-Gobain.

Zerodur® and Lithosil® are registered trademarks of SCHOTT AG.

Herausgeber

LASER COMPONENTS GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
82140 Olching/Germany

fon: +49 8142 2864-0
fax: +49 8142 2864-11

www.lasercomponents.com
info@lasercomponents.com

Geschäftsführer: Günther Paul, Patrick Paul
Handelsregister München HRB 77055

Editor

LASER COMPONENTS GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
82140 Olching/Germany

fon: +49 8142 2864-0
fax: +49 8142 2864-11

www.lasercomponents.com
info@lasercomponents.com

General Managers: Günther Paul, Patrick Paul
Commercial Register in Munich HRB 77055

Diese Broschüre sowie alle enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist für eine Verwertung die Einwilligung der Laser Components GmbH erforderlich. Trotz gründlicher Recherche kann keine Verantwortung für die Richtigkeit der Inhalte übernommen werden. Technische Änderungen ohne Ankündigung vorbehalten.

© 2010. Alle Rechte vorbehalten.

This catalog, including all written and visual entries, is protected by copyright. With the exception of specific cases permitted by law, use of this material without the consent of Laser Components GmbH is punishable by law.

Despite thorough research, Laser Components GmbH will not accept responsibility for any inaccuracy of content. Technical material is subject to change without notice.

© 2010. All rights reserved.

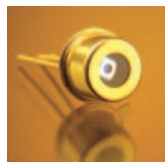
LASER COMPONENTS Group

Manufacturer ▪ Distributor ▪ Partner



In-house Production

- Laser Optics
- cw Laser Diodes
- Pulsed Laser Diodes
- Avalanche Photodiodes
- Laser Modules
- Fiber Assemblies
- Conversion Screens



Detectors

- UV Detectors
- VIS Detectors
- NIR Detectors
- IR Detectors
- Pyro Detectors
- Thermopiles
- Position Sensitive Detectors



Laser Diodes

- cw Laser Diodes
- Pulsed Laser Diodes
- High Power Laser Diodes
- VCSELs
- Quantum Cascade Lasers
- Lead Salt Lasers
- Laser Modules
- LEDs



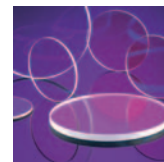
Measurement Technology

- Energy and Power Meters
- Laser Alignment Systems
- Laser Light Barriers
- IR Spectrometers
- Fiber Sensors
- Proximity Sensors



Fiber Optics

- Optical Fibers
- Fiber Assemblies
- Couplers / WDMs
- Connectors
- Modulators
- Fiber Optic Tools
- Optical Switches



Optics

- Laser Optics
- Optical Filters
- Diffractive Optics
- IR Laser Optics
- Electro-Optical Components
- Gratings
- Laser Rods/ Crystals



www.lasercomponents.com

Laser Components GmbH
Laser Components S.A.S.
Laser Components (UK) Ltd.
Laser Components Nordic AB
Laser Components USA, Inc.



www.lasercomponents.com

Germany & Other Countries

Laser Components GmbH
Tel: +49 8142 2864 - 0
Fax: +49 8142 2864 - 11
info@lasercomponents.com

France

Laser Components S.A.S.
Tel: +33 1 39 59 52 25
Fax: +33 1 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr

United Kingdom

Laser Components (UK) Ltd.
Tel: +44 1245 491 499
Fax: +44 1245 491 801
info@lasercomponents.co.uk

Nordic Countries

Laser Components Nordic AB
Tel: +46 31 703 71 73
Fax: +46 31 703 71 01
info@lasercomponents.se

USA

Laser Components USA, Inc.
Tel: +1 603 821 - 7040
Fax: +1 603 821 - 7041
info@lasercomponents.com