

Wissenswertes über Beschichtungen

Valuable Information on Coatings

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

Definition of the Direction of Polarization for a Laser Beam

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.

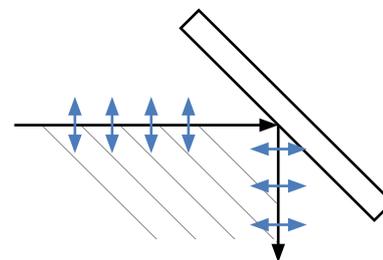
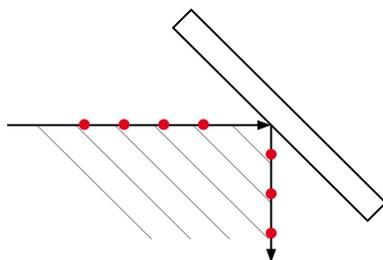
Light is described as a transversal wave that can have two directions of polarization perpendicular to the direction of propagation. This effect is often used to achieve an optimal coating performance.

Bestimmung der Polarisationsrichtung

Determining the Direction of Polarization

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.

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.



s-pol Umlenkung:
Strahl ist senkrecht zur Umlenkebene polarisiert

p-pol Umlenkung:
Strahl ist parallel zur Umlenkebene polarisiert

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

p-pol reflection:
Beam is polarized parallel 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:

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

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:

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

45° Spiegel bei 0° Einfallswinkel eingesetzt

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

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

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°:

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

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°

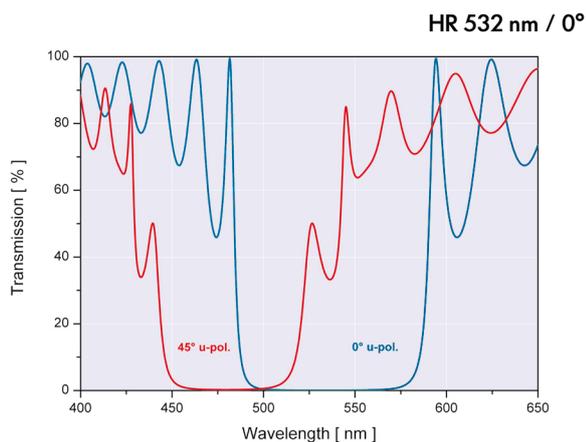
In this case, the central wavelength of these mirrors is shifted to shorter wavelengths. The following applies:

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

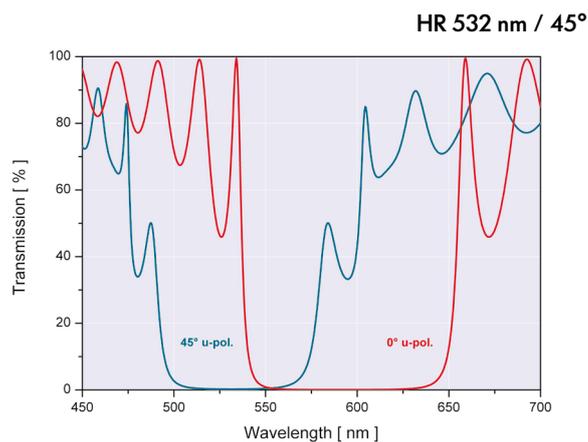
45° mirrors used at an angle of incidence of 0°

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

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

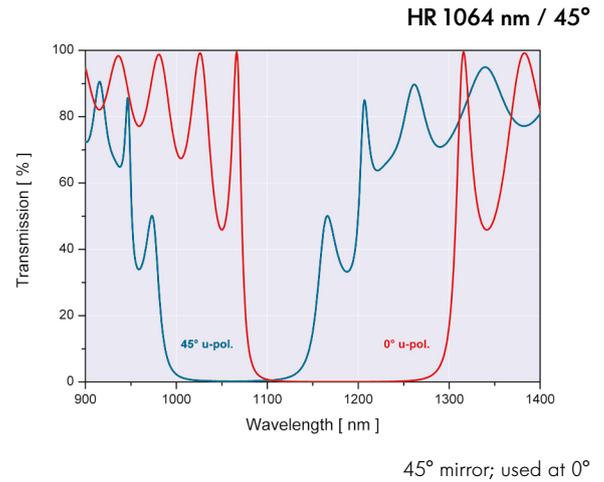
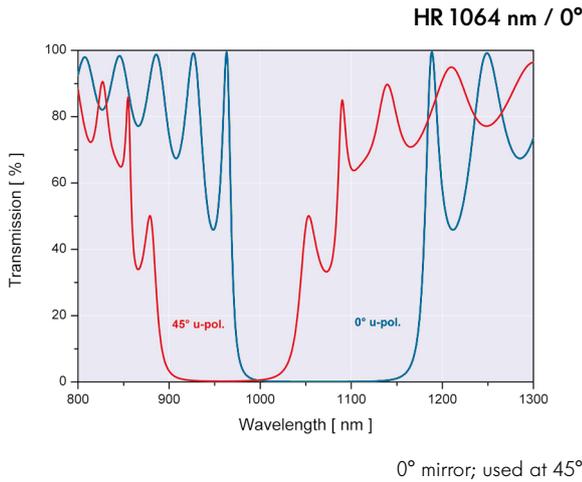


0° mirror; used at 45°



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

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:

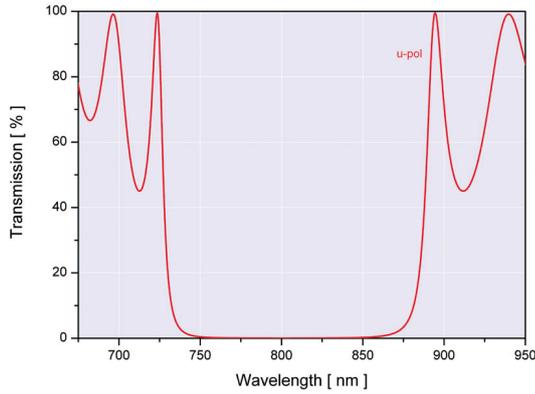
- R > 99 % for AOI 0°
- R > 98 % for AOI 45°

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

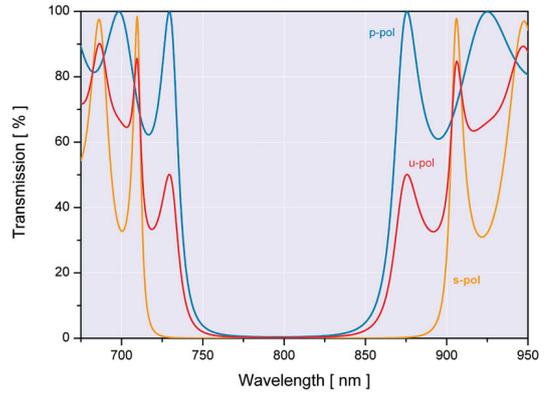
- End mirrors (0° angle of incidence)
 $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.1$
- Bending mirrors (45° angle of incidence)
 - u-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.1$
 - s-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.15$
 - p-pol: $\Delta\lambda \approx \lambda_{\text{Central}} \times 0.05$



HR 800 nm / 0°; high power



HR 800 nm / 45°; high power



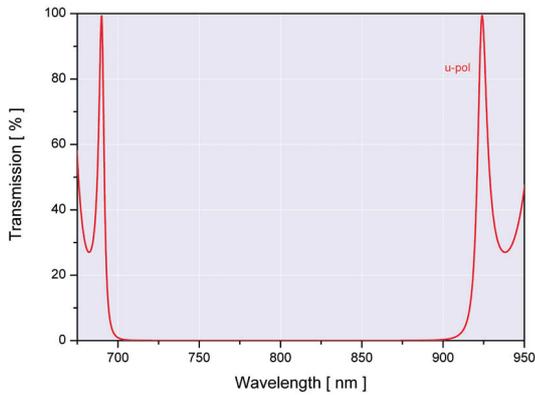
**Typische Bandbreiten von cw-/fs-Beschichtungen
450 nm bis 1600 nm**

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

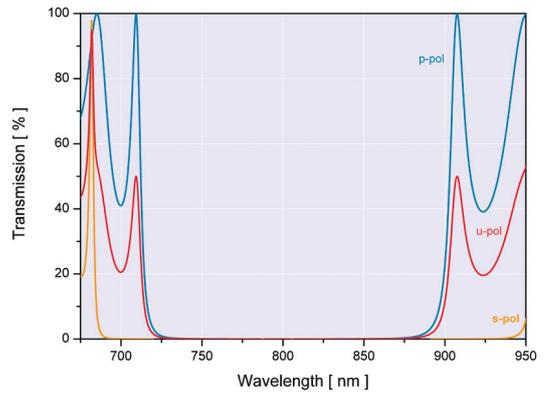
**Typical Bandwidths of cw/fs Coatings
450 nm to 1600 nm**

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

HR 800 nm / 0°; cw/fs



HR 800 nm / 45°; cw/fs



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

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.

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

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.



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 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.

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

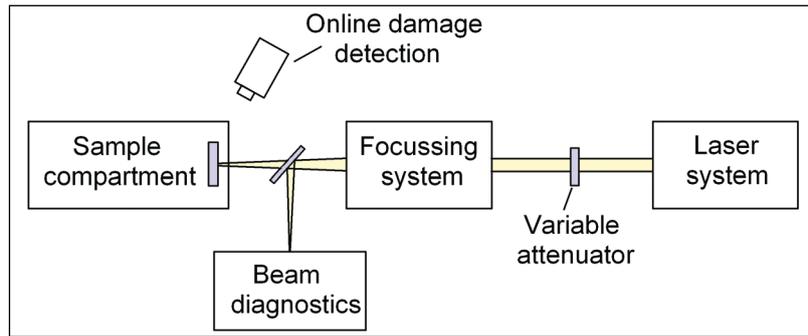
The measurement setup, which consists of a laser system, a variable energy attenuator, a focussing unit, beam diagnosis, a movable substrate mount, and the in situ detection of resulting damage, is crucial to achieving qualitative measurements.

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.

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 eingestrahlenen 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 Zerstörwahrscheinlichkeit 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.

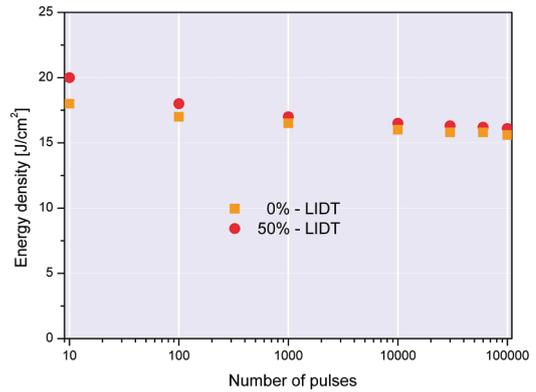
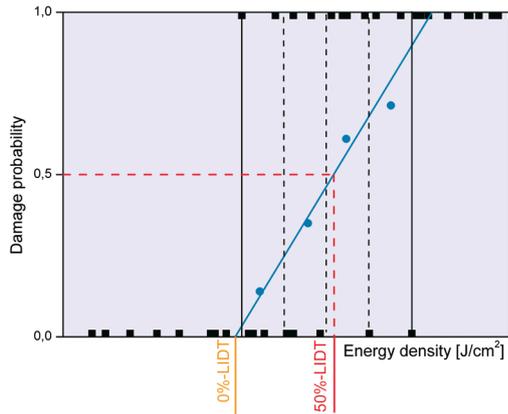
Measurement Assessment

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 Zerstörungsschwellentests werden mit LC-Standard-Substraten aus Quarzglas mit Laserpolitur durchgeführt, da die Substratqualität auf die Zerstörungsschwelle 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

Causes of Damage

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.

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.

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

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.

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

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.

