

	DIN EN ISO 21254-1	
ICS 31.260	<div>Entwurf</div>	Einsprüche bis 2024-07-03 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN ISO 21254-1:2011-10
<p>Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für die laserinduzierte Zerstörschwelle – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundsätze (ISO/DIS 21254-1:2024); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 21254-1:2024</p> <p>Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage threshold – Part 1: Definitions and general principles (ISO/DIS 21254-1:2024); German and English version prEN ISO 21254-1:2024</p> <p>Lasers et équipements associés aux lasers – Méthodes d’essai du seuil d’endommagement provoqué par laser – Partie 1: Définitions et principes de base (ISO/DIS 21254-1:2024); Version allemande et anglaise prEN ISO 21254-1:2024</p> <p>Anwendungswarnvermerk</p> <p>Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-05-03 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.</p> <p>Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.</p> <p>Stellungnahmen werden erbeten</p> <ul style="list-style-type: none">– vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;– oder als Datei per E-Mail an nafuo@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;– oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO), Alexander-Wellendorff-Str. 2, 75172 Pforzheim. <p>Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.</p> <p>Gesamtumfang 81 Seiten</p> <p>DIN-Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO)</p>		

Nationales Vorwort

Das Dokument prEN ISO 21254-1:2024 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 172 „Optics and Photonics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 123 „Laser und Photonik“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 027-01-18 AA „Laser und elektrooptische Systeme“ im DIN-Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

DIN EN ISO 21254 besteht unter dem allgemeinen Titel *Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für die laserinduzierte Zerstörschwelle* aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: *Begriffe und allgemeine Grundsätze*
- Teil 2: *Bestimmung der Zerstörschwelle*
- Teil 3: *Zertifizierung der Belastbarkeit hinsichtlich Laserleistung (-energie)*

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 11145	siehe	DIN EN ISO 11145
ISO 11146-1	siehe	DIN EN ISO 11146-1
ISO 11146-2	siehe	DIN EN ISO 11146-2
ISO 11554	siehe	DIN EN ISO 11554
ISO 13694	siehe	DIN EN ISO 13694
ISO 14997	siehe	DIN ISO 14997
ISO 21254-2	siehe	DIN EN ISO 21254-2
ISO 21254-3	siehe	DIN EN ISO 21254-3

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 21254-1:2011-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Es werden Kriterien für funktionelle Schäden und die funktionelle Schadensschwelle (F-LIDT) eingeführt;
- b) Es werden neue Einheiten für die Laserbestrahlungsstärke eingeführt;
- c) Es werden zwei neue Prüfprotokolle eingeführt:
 - 1) Erweiterung des R(S)-auf-1-Tests;
 - 2) Erweiterung des Rasterscan-Tests;
- d) Integration eines neuen Abschnitts „Allgemeine Verwendungshinweise“ in Anhang A;
- e) Die Diskussion über die Genauigkeit von Messeinheiten wird erweitert.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 11145, *Optik und Photonik – Laser und Laseranlagen – Begriffe und Formelzeichen*

DIN EN ISO 11146-1, *Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen – Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen*

DIN EN ISO 11146-2, *Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen – Teil 2: Allgemein astigmatische Strahlen*

DIN EN ISO 11554, *Optik und Photonik – Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Leistung, Energie und Kenngrößen des Zeitverhaltens von Laserstrahlen*

DIN EN ISO 13694, *Optik und Photonik – Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für die Leistungs-(Energie-)dichteverteilung von Laserstrahlen*

DIN EN ISO 21254-2, *Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für die laserinduzierte Zerstörschwelle – Teil 2: Bestimmung der Zerstörschwelle*

DIN EN ISO 21254-3, *Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für die laserinduzierte Zerstörschwelle*

DIN ISO 14997, *Optik und Photonik – Prüfverfahren für Oberflächenunvollkommenheiten optischer Elemente*

– Leerseite –

**Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für die laserinduzierte Zerstörschwelle –
Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundsätze (ISO/DIS 21254-1:2024)**

Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage threshold – Part 1: Definitions and general principles (ISO/DIS 21254-1:2024)

Lasers et équipements associés aux lasers – Méthodes d'essai du seuil d'endommagement provoqué par laser – Partie 1: Définitions et principes de base (ISO/DIS 21254-1:2024)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
3.1 Symbole und Maßeinheiten	8
3.2 Begriffe	10
4 Maßeinheiten der Laserbestrahlung, der laserinduzierten Zerstörschwelle und einschlägige Maßeinheiten	11
5 Laserinduzierte Beschädigung, Zerstörschwelle und zugehörige Kriterien	12
5.1 Allgemeines	12
5.1.1 Klassisches Kriterium bei laserinduzierter Beschädigung	12
5.1.2 Funktionelles Kriterium bei laserinduzierter Beschädigung	12
5.1.3 Fehlerart	12
5.1.4 Laserinduzierte Zerstörschwelle (LIDT, en: laser-induced damage threshold)	12
5.1.5 Funktionelle laserinduzierte Zerstörschwelle (F-LIDT, en: functional laser-induced damage threshold)	12
5.1.6 Verfahren zur Berechnung der Zerstörschwelle	12
5.2 Techniken zur Messung der laserinduzierten Beschädigungen und verwandte Begriffe	13
5.2.1 Allgemeines	13
5.2.2 Klassische 1-auf-1-Prüfung	13
5.2.3 Klassische S-auf-1-Prüfung	13
5.2.4 Funktionelle R(S)-auf-1-Prüfung	13
5.2.5 Funktionelle Rasterscanprüfung	13
5.2.6 Annahmeprüfung „Bestanden – Nicht bestanden“	13
5.2.7 Laserinduzierte Ermüdung	14
5.2.8 Charakteristische Zerstörungskurve oder Ermüdungskurve	14
5.2.9 Laserinduzierte Konditionierung	14
5.2.10 Konditionierungskurve	14
5.3 Parameter für Prüfung, Probenahme und Berichterstattung	14
5.3.1 Typischer Puls	14
5.3.2 Bestrahlungsniveau der Laserquelle L	14
5.3.3 Maximale Bestrahlungsdosis	14
5.3.4 Aufgebrachte Bestrahlungsdosis	15
5.3.5 Prüfebene	15
5.3.6 Gesamtbestrahlungsfläche $A_{90\%}$	15
6 Probenahme	15
7 Prüfverfahren	15
7.1 Kurzbeschreibung	15
7.2 Prüfeinrichtung	16
7.2.1 Laser	16
7.2.2 Variabler Abschwächer und Strahlführungssystem	17
7.2.3 Fokussiersystem	17
7.2.4 Probenhalter	18
7.2.5 Systeme zur Beschädigungsdetektion und -prüfung	18
7.2.6 Strahldiagnostikeinheit	18
7.3 Vorbereitung der Proben für die Prüfung	21
7.4 Durchführung der Prüfung	22
8 Genauigkeit des Spitzenbestrahlungsniveaus	23
8.1 Allgemeines	23

8.2	Die relative Standardabweichung der Spitzenfluenz	23
8.3	Die relative Standardabweichung der Spitzenbestrahlungsstärke	23
8.4	Die relative Standardabweichung der linearen Leistungsdichte	24
8.5	Die relative Standardabweichung der mittleren Spitzenbestrahlungsstärke	24
9	Prüfbericht	25
Anhang A (normativ) Allgemeine Anwendungshinweise		27
A.1	Hintergrund, Einschränkungen und Zweck der Zerstörungsprüfung	27
A.1.1	Probengröße und Probenform	27
A.1.2	Vorherrschende Fehlerart	28
A.1.3	Einschränkungen des maximalen Bestrahlungsniveaus der Laserquelle	29
A.1.4	Zerstörkriterium	30
A.1.5	Zweck der Prüfung	30
A.2	Überblick über Prüfverfahren und anwendungsrelevante Anwendungsfälle	30
A.2.1	R(S)-auf-1-Prüfung	30
A.2.2	1-auf-1-Prüfung	31
A.2.3	Rasterscanprüfung	31
A.2.4	S-auf-1-Prüfung	32
A.2.5	Annahmeprüfung „Bestanden — Nicht bestanden“	32
A.2.6	Kombinierte Prüfverfahren	32
A.2.7	Weitere bekannte Einschränkungen der Prüfung	33
A.3	Auswahl der am besten geeigneten Zerstörkriterien und Prüfroutine	33
A.4	Auswahl geeigneter Maßeinheiten für die Laserbestrahlung	36
A.4.1	Allgemeines	36
A.4.2	Femtosekunden- und Pikosekundenbereich	36
A.4.3	Pikosekunden-, Nanosekunden- und Mikrosekundenbereich	36
A.4.4	Dauerstrichbetrieb	37
A.5	Kriterium für die Sichtbarkeit von Beschädigungen mittels DIC-Mikroskopie	38
Literaturhinweise		39

Bilder

Bild 1 — Grundlegendes Prinzip bei der Prüfung der laserinduzierten Beschädigung	16
--	----

Tabellen

Tabelle 1 — Fehlerbilanz einer Zerstörschwellenmesseinrichtung	24
Tabelle A.3 — Überblick über die verschiedenen Prüfverfahren, die empfohlenen Anwendungsfälle und die damit verbundenen Risiken	34

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 21254-1:2024) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 172 „Optics and Photonics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 123 „Laser und Photonik“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 21254:2011 ersetzen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 21254-1:2024 wurde von CEN als prEN ISO 21254-1:2024 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Directives, Teil 1, beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Directives, Teil 2, erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 172, *Optics and Photonics*, Unterkomitee SC 9, *Laser and electro-optical systems*, erarbeitet.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 21254:2011), die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind folgende:

- es werden Kriterien für funktionelle Beschädigungen und die funktionelle Zerstörschwelle (F-LIDT) eingeführt;
- es werden neue Maßeinheiten für das Bestrahlungsniveau der Laserquelle eingeführt;
- es werden zwei neue Prüfverfahren eingeführt:
 - Erweiterung der R(S)-auf-1-Prüfung;
 - Erweiterung der Rasterscanprüfung;
- Aufnahme eines neuen Abschnitts „Allgemeine Anwendungshinweise“ in Anhang A;
- die Erläuterung der Genauigkeit der Maßeinheiten wurden erweitert.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 21254 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

E DIN EN ISO 21254-1:2024-06
prEN ISO 21254-1:2024 (D)

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Optische Komponenten werden oberhalb der sogenannten laserinduzierten Zerstörschwelle (en: laser-induced damage threshold, LIDT oder Beschädigungsgrenzwert) irreversibel geschädigt: das ist das maximale Bestrahlungsniveau der Laserquelle, bei dem die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung gleich Null ist. Unterhalb der Einzelschuss-Zerstörschwelle könnte sich im Laufe der Zeit auch ein verzögertes Zerstörungsereignis als Folge einer wiederholten Laserbestrahlung entwickeln: der sogenannte Ermüdungseffekt. Alternativ kann eine wiederholte Exposition mit allmählich zunehmender Laserbestrahlung eine Erhöhung der Zerstörschwelle bewirken: der sogenannte Konditionierungseffekt. In der überwiegenden Mehrzahl der Anwendungsfälle entstehen die Beschädigungen häufiger auf optischen Oberflächen. Nur in bestimmten Fällen treten sie in der Festkörpermasse (en: bulk) auf. Daher wird die laserinduzierte Zerstörschwelle, sofern nicht anders gefordert oder angegeben, für die Eintrittsfläche der optischen Komponente geprüft und angegeben. Bei optischen Komponenten mit hohem Transmissionsgrad kann sich die Beschädigung zunächst an der Austrittsfläche oder in der Festkörpermasse der Komponente entwickeln, ohne dass eine Beschädigung der Eintrittsfläche aufgrund von Effekten zur Verstärkung des Strahlungsfeldes zu beobachten ist: Selbstfokussierung, Beugung oder Interferenz mit rückreflektiertem Licht. Eine Beschädigung der Rückseite kann auch niedrigere Zerstörschwellen aufweisen als die der Eintrittsfläche, was auf eine schlechte optische Qualität zurückzuführen ist. In solchen Fällen kann eine Prüfung der funktionellen Zerstörschwelle für die Austrittsfläche durchgeführt werden. Allerdings müssen die Fokussierungsbedingungen und das Kriterium der funktionellen Beschädigung im Prüfbericht dokumentiert werden. Umweltverschmutzung durch Partikel in der Luft, flüchtige organische Verbindungen, Vakuumexposition und technologische Unzulänglichkeiten, wie z. B. noduläre Defekte in Beschichtungen, Polierkratzer, Beilby-Schichten, Beschädigungen unter der Oberfläche sowie Volumeneinschlüsse, Versetzungen oder Inhomogenitäten anderer Art, können die Leistung einer optischen Komponente ebenfalls beeinträchtigen.

Aufgrund der zahlreichen möglichen Versagensmechanismen [7 bis 63] ist die experimentell geschätzte „Zerstörschwelle“ ein aggregiertes Merkmal aus Handhabung der optischen Komponenten, Umweltbedingungen, Material- und Oberflächenvorbereitungstechniken sowie der laserbezogenen Bestrahlungsparameter wie Wellenlänge, Strahlgröße, Bestrahlungsparameter wie Wellenlänge, Strahldurchmesser, Pulsfolgefrequenz und Pulsdauer. Infolgedessen gibt es kein einziges Verfahren, das universell alle Prüfanforderungen für alle Arten von optischen Komponenten erfüllen könnte. Stattdessen haben sich verschiedene Zerstörungsprüfungsstrategien herausgebildet, die auf bestimmte Prüfanforderungen zugeschnitten sind. Die verschiedenen Teile dieses Dokuments befassen sich mit der Bestimmung von irreversiblen Beschädigungen der optischen Oberflächen und Schädigung der Festkörpermasse einer optischen Komponente unter dem Einfluss eines Laserstrahls. Dieses Dokument befasst sich mit den Grundlagen und allgemeinen Grundsätzen für die Messung von laserinduzierten Zerstörschwellen (LIDT, en: laser-induced damage threshold). Anhand der in ISO 21254-1 beschriebenen Prüfgeräte werden in ISO 21254-2 Messverfahren für die Zerstörungsprüfung (1-auf-1, S-auf-1, R(S)-auf-1 und Rasterscan) und in ISO 21254-3 die Annahmeprüfung beschrieben. Empfehlungen und Risiken, die mit dem jeweiligen Prüfverfahren verbunden sind, sind in Anhang A ausführlicher erläutert.

Die „klassische“ 1-auf-1-Prüfung ist ein Zerstörschwellen-Messverfahren, bei dem ein einziger Laserpuls auf jeden unbestrahlten Ort auf der Probenoberfläche aufgebracht wird. Im Gegensatz dazu beruht das „klassische“ S-auf-1-Messverfahren auf einer Serie von Pulsen mit einem konstanten Bestrahlungsniveau der Laserquelle, die auf jeden unbestrahlten Ort der Probenoberfläche aufgebracht werden. Die Prüfung mit mehreren Laserpulsen entspricht eher den Einsatzbedingungen in der Praxis, allerdings ist der experimentelle Aufwand für S-auf-1-Prüfungen auch deutlich höher. Die Normenreihe ISO 21254 führt auch neue Alternativen ein – das Konzept der „funktionellen“ Zerstörschwelle und neue Messverfahren wie R(S)-auf-1 und Rasterscan. Bei einer R(S)-auf-1-Prüfung wird dieselbe Prüfstelle mit einer Folge von (S)-Pulsen bestrahlt, wobei das Bestrahlungsniveau zwischen den einzelnen Bestrahlungen schrittweise erhöht wird, bis die Beschädigung beobachtet wird. Eine weitere Erweiterung dieses Messkonzepts ist das Rasterscanverfahren, bei dem ein erheblicher Teil der Prüffläche mit räumlich überlappenden Laserpulsen bestrahlt wird. ISO 21254-3 beschreibt die Abnahmeprüfung für einen bestimmten Laserbestrahlungsgrad optischer Oberflächen, wobei Proben, die die Prüfung bestehen, unbeschädigt bleiben. ISO/TR 21254-4 ist ein Technischer Bericht, der sich mit Verfahren für die Beschädigungsdetektion und Qualitätskontrolle von geprüften Oberflächen befasst und vervollständigt dieses Dokument.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Begriffe und die allgemeinen Grundsätze von Prüfverfahren fest, die zur Bestimmung der laserinduzierten Zerstörschwelle und Belastbarkeit von optischen, mit Laserstrahlung beanspruchten Laserkomponenten verwendet werden.

WARNHINWEIS Die Exposition von toxischen Werkstoffen (z. B. ZnSe, GaAs, CdTe, ThF₄, Chalkogenide, Be, Cr, Ni) durch Laser kann zu ernsthaften Gesundheitsschäden führen.

WARNHINWEIS Bei der Prüfung für die laserinduzierte Zerstörschwelle kommen Hochleistungslaser zum Einsatz, deren Verwendung mit erheblichen Risiken verbunden sein kann, wie z. B. Augenverletzungen bei Personen, Laserverbrennungen bei Personen oder Geräten, Entzündung von Werkstoffen, Freisetzung toxischer Stoffe im Substrat oder in der Beschichtung sowie elektrische Gefahren. Es liegt in der Verantwortung des Anwenders, die örtlichen Richtlinien und Vorschriften für seine spezielle Einrichtung einzuhalten.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 11145, *Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Vocabulary and symbols*

ISO 11146-1, *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios — Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams*

ISO 11146-2, *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios — Part 2: General astigmatic beams*

ISO 13694, *Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution*

ISO 21254-2, *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser-induced damage threshold — Part 2: Threshold determination*

ISO 21254-3, *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser-induced damage threshold — Part 3: Assurance of laser power (energy) handling capabilities*

ISO/TR 21254-4, *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser-induced damage threshold — Part 4: Inspection, detection and measurement*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 11145 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.1 Symbole und Maßeinheiten

Die Symbole und Maßeinheiten sind im Folgenden zusammengefasst:

Symbol	Einheit	Begriff
λ	nm	Wellenlänge
α	rad	Einfallswinkel (AOI, en: angle of incidence)
p		Art und Grad der Polarisierung: linear (s oder p), zirkular, elliptisch, zufällig
d_T	cm	Strahldurchmesser (Spitze/ e^2 -Ebene – nur bei Gauß'schen Strahlen) bei senkrechtem Einfall
$d_{T,eff}$	cm	effektiver Strahldurchmesser in der Prüfebene bei senkrechtem Einfall
$A_{T,eff}$	cm ²	effektive Fläche des typischen Laserpulses in der Prüfebene bei senkrechtem Einfall
$\overline{A}_{T,eff}$	cm ²	zeitlich gemittelte effektive Fläche in der Prüfebene entsprechend der Laserpulsfolge bei senkrechtem Einfall
$\overline{E}_{max}$	Bitanzahl	zeitlich gemittelter Zahlenwert des intensivsten Pixels innerhalb des von der lichtempfindlichen Anordnung erfassten Strahlprofils bei kontinuierlicher (Dauerstrich, CW) oder quasi-kontinuierlicher (Quasidauerstrich, q-CW) Laserbestrahlung in der Prüfebene bei senkrechtem Einfall
$A_{90\%}$	cm ²	AOI-angepasste bestrahlte Gesamtfläche je Prüfung bei dem höchsten Bestrahlungsniveau ohne Beschädigung, unterhalb der niedrigsten beobachteten Beschädigung oder dem für die Annahmeprüfung festgelegten Niveau
τ_{FWHM}	s	Pulsdauer bei der Halbwertsbreite (FWHM, en: full width of half maximum)
τ_{eff}	s	effektive Pulsdauer
f_p	Hz	Pulsfrequenz
Q	J	Pulsenergie
P_{pk}	W	Spitzenstrahlungsleistung
P_{av}	W	mittlere Strahlungsleistung
H	J/cm ²	Spitzenfluenz, AOI-angepasst
H_{max}	Bitanzahl	Zahlenwert des intensivsten Pixels innerhalb der Einzelpuls-Strahlprofilverteilung bei gepulster Laserbestrahlung in der Prüfebene bei senkrechtem Einfall
E	W/cm ²	mittlere Spitzenbestrahlungsstärke, AOI-angepasst
F	W/cm	lineare Spitzenleistungsdichte, AOI-angepasst
I	W/cm ²	Spitzenbestrahlungsstärke, AOI-angepasst
H_{th}	J/cm ²	Schwellenfluenz, AOI-angepasst
E_{th}	W/cm ²	Schwellenwert der mittleren Bestrahlungsstärke, AOI-angepasst
E_{max}	Bitanzahl	intensivstes Pixel innerhalb des Strahlprofils, das von der lichtempfindlichen Anordnung für einen einzelnen typischen Impuls der Dauerstrichlaserstrahlung in der Prüfebene bei senkrechtem Einfall aufgenommen wurde
F_{th}	W/cm	Schwellenwert der linearen Leistungsdichte, AOI-angepasst
I_{th}	W/cm ²	Schwellenwert der Bestrahlungsstärke, AOI-angepasst
N_{min}		Mindestanzahl von Laserpulsen, die erforderlich ist, um eine Beschädigung zu verursachen
TTF	s	Zeit bis zum Versagen – Mindestbestrahlungszeit, die erforderlich ist, um eine Beschädigung zu verursachen

S	Pulszahl (oder Zeitzahl)	die maximale Anzahl von Pulsen (oder Bestrahlungszeit) je Ort je Bestrahlungsniveau der Laserquelle
N_{ts}	Anzahl der Prüferte (oder cm^2)	Gesamtanzahl der Prüferte (oder Fläche) bei der Prüfung

3.2 Begriffe

3.2.1

Spitzenfluenz Spitzenenergiedichte

H

AOI-eingestellte Strahlungsenergie je effektive Fläche des typischen Pulses

$$H = \frac{Q \cos(\alpha)}{A_{T,\text{eff}}} \quad (1)$$

3.2.2

Spitzenbestrahlungsstärke

I

AOI-eingestellte Strahlungsenergie je effektive Pulsdauer je effektive Fläche des typischen Pulses

$$I = \frac{H}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{Q \cos(\alpha)}{A_{T,\text{eff}} \tau_{\text{eff}}} \quad (2)$$

3.2.3

lineare Spitzenleistungsdichte

F

AOI-eingestellte mittlere Leistung der Laserbestrahlung je effektiver Strahldurchmesser

$$F = \frac{P_{\text{av}} \cos(\alpha)}{d_{T,\text{eff}}} \quad (3)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Kosinus des Einfallswinkels gibt die Verlängerung des effektiven Strahls in der projizierten Prüfebene an.

3.2.4

mittlere Spitzenbestrahlungsstärke

E

AOI-eingestellte mittlere Laserstrahlungsleistung je zeitgemittelte effektive Fläche:

$$E = \frac{P_{\text{av}} \cos(\alpha)}{\bar{A}_{T,\text{eff}}} \quad (4)$$

3.2.5.1

effektive Fläche

$A_{T,\text{eff}}$

<gepulste Laser> Verhältnis der gesamten Pulsenergie zur Spitzenfluenz in der Prüfebene bei senkrechtem Einfall:

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{Q}{H} \quad (5)$$

3.2.5.2

effektive Fläche

$\bar{A}_{T,\text{eff}}$

<Dauerstrichlaser- oder Quasidauerstrichlasersysteme> Verhältnis der mittleren Leistung P_{av} zur zeitgemittelten Spitzenbestrahlungsstärke E bei senkrechtem Einfall

$$\bar{A}_{T,\text{eff}} = \frac{P_{av}}{E} \quad (6)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Index T bezeichnet die Prüfebene (siehe 5.3.5) als eine Referenz bei senkrechtem Einfall.

3.2.6

effektiver Strahldurchmesser

$d_{T,\text{eff}}$

Durchmesser der effektiven Fläche, gegeben durch das Doppelte der Quadratwurzel der effektiven Fläche dividiert durch π

$$d_{T,\text{eff}} = 2 \sqrt{\frac{A_{T,\text{eff}}}{\pi}} \quad (7)$$

3.2.7

effektive Pulsdauer

τ_{eff}

Verhältnis der Pulsenergie zur Strahlungsspitzenleistung

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{Q}{P_{\text{pk}}} \quad (8)$$

4 Maßeinheiten der Laserbestrahlung, der laserinduzierten Zerstörschwelle und einschlägige Maßeinheiten

In Abhängigkeit von der Art der Laserbestrahlung bei einer praktischen Anwendung wird/werden die am besten geeignete(n) Maßeinheit(en) für die Definition der laserinduzierten Zerstörschwelle entsprechend A.4 ausgewählt:

- Spitzenfluenz H ;
- Spitzenbestrahlungsstärke I ;
- lineare Spitzenleistungsdichte F ;
- mittlere Spitzenbestrahlungsstärke E .

ANMERKUNG 1 Aufgrund der historischen Entwicklung der Lasertechnologie werden in der Praxis häufig andere Begriffe für die Laserbestrahlung verwendet. In diesem Zusammenhang werden die Begriffe „Energiedichte (en: energy density)“ oder „Energiedichte (en: radiance exposure)“ (in ISO 11145) häufig der aufgetragenen Strahlungsenergie je Flächeneinheit (in Einheiten von J/cm^2) zugeordnet, und der Begriff „Intensität (en: intensity)“ wird häufig für die aufgetragene Strahlungsleistung je Flächeneinheit (in Einheiten von W/cm^2) verwendet. In Anbetracht der spezifischen Schädigungsmechanismen und ihrer Skalierungsgesetze im Zusammenhang mit Dauerstrichbestrahlung wird in ISO 21254 der Begriff „lineare Leistungsdichte (en: linear power density)“ verwendet, der die lineare Strahlungsleistungsdichte (in Einheiten W/cm) bezeichnet. Zur Harmonisierung der Definitionen werden in dieser Norm die Begriffe „Fluenz“ (bezeichnet die Strahlungsenergie je Flächeneinheit) und „Bestrahlungsstärke“ (bezeichnet die Strahlungsleistung je Flächeneinheit) verwendet.

Bei der Bestrahlung der Prüfebene unter einem Einfallswinkel α ungleich 0 rad muss der Kosinusfaktor in die Berechnung des Bestrahlungsniveaus der Laserquelle einbezogen werden, um die Verlängerung des effektiven Strahls zu berücksichtigen.

5 Laserinduzierte Beschädigung, Zerstörschwelle und zugehörige Kriterien

5.1 Allgemeines

Die geschätzte Zerstörschwelle hängt in hohem Maße vom gewählten Zerstörkriterium (Detektionsverfahren und dessen Empfindlichkeit) sowie vom Prüfverfahren und der insgesamt untersuchten Fläche je Prüfung ab. In Hinblick auf die Vielzahl der bekannten Beschädigungsdetektionsverfahren und -messverfahren muss bei der Angabe der Prüfergebnisse eine klare Unterscheidung zwischen klassischer und funktioneller Zerstörschwelle getroffen werden.

5.1.1 Klassisches Kriterium bei laserinduzierter Beschädigung

Jede bleibende durch Laserstrahlen induzierte Veränderung oder Modifikation des bestrahlten Bereiches (entweder Oberfläche oder Festkörpermasse), die mittels Differentialinterferenzkontrastmikroskopie (DIC, en: differential interference contrast microscopy) erkennbar ist.

Ein Mikroskopobjektiv mit einer 10-fachen Vergrößerung (mindestens $NA = 0,25$ oder besser) muss zusammen mit einem geeigneten Abbildungssystem oder einer Okularlinse verwendet werden, um mindestens eine 150-fache Vergrößerung bei der klassischen Zerstörungsprüfung zu erreichen. Eine im DIC sichtbare durch Laserstrahlen induzierte Veränderung gilt als „Beschädigung“; eine nicht sichtbare Veränderung als „keine Beschädigung“.

5.1.2 Funktionelles Kriterium bei laserinduzierter Beschädigung

Jede beobachtbare oder messbare (bleibende oder reversible) durch Laserstrahlen induzierte Veränderung der funktionellen Leistung der optischen Komponente, die mit einer Online- oder Offline-Überwachungstechnik aufgezeichnet werden kann, die für die beabsichtigte Endanwendung relevant ist.

5.1.3 Fehlerart

Art eines bestimmten physikalischen Mechanismus oder einer Abfolge zusammenhängender Phänomene, durch die eine laserinduzierte Beschädigung (Fehler) auftritt.

5.1.4 Laserinduzierte Zerstörschwelle (LIDT, en: laser-induced damage threshold)

Laserinduzierte Zerstörschwelle, die mittels klassischem 1-auf-1- oder S-auf-1-Messverfahren als größte Menge an Laserstrahlung, die auf die optische Komponente auftrifft und bei der die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung nach dem klassischen Zerstörkriterium gleich Null ist, geschätzt wurde.

5.1.5 Funktionelle laserinduzierte Zerstörschwelle (F-LIDT, en: functional laser-induced damage threshold)

Die funktionelle laserinduzierte Zerstörschwelle ist definiert als die größte geschätzte Menge an Laserstrahlung, die auf die optische Komponente auftrifft, ohne dass eine Verschlechterung nach einem vom Benutzer definierten funktionellen Zerstörkriterium, das für die Endanwendung spezifisch ist (siehe Anhang A für weitere Einzelheiten), eintritt.

5.1.6 Verfahren zur Berechnung der Zerstörschwelle

In Abhängigkeit von der Art der vorherrschenden Beschädigung durch Laserbestrahlung und dem ausgewählten Messverfahren sollte das geeignete Verfahren zur Bewertung der Zerstörschwellen verwendet werden:

- 1) Zerstörwahrscheinlichkeitsverfahren:

höchstes Bestrahlungsniveau mit einer extrapolierten Zerstörwahrscheinlichkeit von Null bei Fehlerarten mit nicht-deterministischer Beschädigungsstatistik;

2) HBFD-Mittelwertverfahren:

Mittelwert aus zwei Bestrahlungsniveaus der Laserquelle: „höchstes Bestrahlungsniveau vor einer Beschädigung“ und „Bestrahlungsniveau mit einer ersten Beschädigung“ bei Fehlerarten mit deterministischen Beschädigungseffekten oder Prüfroutinen, bei denen die Zerstörwahrscheinlichkeit nicht direkt gemessen wird.

5.2 Techniken zur Messung der laserinduzierten Beschädigungen und verwandte Begriffe

5.2.1 Allgemeines

Es gibt drei grundlegende Arten von Zerstörungsprüfungen: die „klassische Prüfung“, die „funktionelle Prüfung“ und die „Annahmeprüfung“. 1-auf-1- und S-auf-1-Prüfungen werden zur Bestimmung der „klassischen“ Zerstörschwellen verwendet – LIDT; funktionelle Prüfungen dienen zur Bestimmung der Schwellenwerte für die Leistung der funktionellen Komponente – F-LIDT; Annahmeprüfungen werden zur Qualifizierung der optischen Komponente für eine bestimmte Anwendung verwendet.

5.2.2 Klassische 1-auf-1-Prüfung

Prüfverfahren, bei dem mehrere, räumlich gut voneinander getrennte Prüforte der Probe jeweils mit einem einzigen Laserpuls so bestrahlt werden, dass die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung als Funktion des Bestrahlungsniveaus der Laserquelle (umfasst einen Übergangsbereich von 0 % bis 50 % oder höher) abgeschätzt werden kann.

5.2.3 Klassische S-auf-1-Prüfung

Prüfverfahren, bei dem mehrere, räumlich gut voneinander getrennte Prüforte mit maximal S Laserschüssen je Prüfort bestrahlt werden. Für jedes Bestrahlungsniveau werden mehrere Prüforte so bestrahlt, dass die Dosis (Zeit oder Pulse), die erforderlich ist, um eine Beschädigung zu verursachen, für das jeweilige Bestrahlungsniveau und den jeweiligen Prüfort aufgezeichnet wird. Die Zerstörwahrscheinlichkeit wird anschließend innerhalb jeder interessierenden Pulsklasse geschätzt, die einen Übergang von 0 % bis 50 % oder höher umfasst.

5.2.4 Funktionelle R(S)-auf-1-Prüfung

Prüfverfahren, bei dem ein oder mehrere Prüforte mit einem Bestrahlungsniveau der Laserquelle untersucht werden, das schrittweise erhöht wird. Das Bestrahlungsniveau wird entweder linear oder nichtlinear erhöht, bis ein Zerstörereignis nachgewiesen oder das maximale Bestrahlungsniveau des Systems erreicht wird; für jedes Bestrahlungsniveau kann entweder ein einzelner Puls oder mehrere Pulse (S) angewendet werden.

5.2.5 Funktionelle Rasterscanprüfung

Prüfverfahren, bei dem ein zuvor definierter Prüfbereich der Probe mit raumüberlappender Laserbestrahlung so abgetastet wird, dass die festgelegte Bestrahlungsniveauabdeckung (z. B. 90 % des Spitzenwertes) im gesamten Scanbereich sichergestellt ist. Das Bestrahlungsniveau der Laserquelle wird entweder linear oder nichtlinear erhöht, bis ein Zerstörereignis festgestellt oder das maximale Bestrahlungsniveau des Systems erreicht wird; der Prüfbereich wird vor der Prüfung und nach (oder während) jeder neuen Abtastung auf Beschädigungen untersucht.

5.2.6 Annahmeprüfung „Bestanden – Nicht bestanden“

Prüfverfahren, bei dem die Probe mit einem genau festgelegten Spitzenbestrahlungsniveau, einer zuvor definierten Bestrahlungszeit und auf einem Prüfbereich, der den realistischen Bestrahlungsbedingungen der vorgesehenen Anwendung entspricht, bestrahlt wird (entweder an einem oder mehreren Prüforten oder einem zuvor definierten Abtastbereich). Die Probe wird vor und nach der Prüfung untersucht. Bei „Keine Beschädigung“ hat das optische Element die Prüfung bestanden und gilt als geeignet für den vorgesehenen Anwendungsfall.

5.2.7 Laserinduzierte Ermüdung

Abnahme der Fähigkeit der Probe, mit der Laserleistung (-energie) fertig zu werden, aufgrund längerer, wiederholter Laserbestrahlung bei festem Bestrahlungsniveau, die zu einer begrenzten Lebensdauer führt.

ANMERKUNG Wiederholte Laserbestrahlung unterhalb der Zerstörschwelle eines einzelnen Schusses (1-auf-1) kann manchmal zu zeitlich verzögerten Zerstörereignissen führen. Die Ermüdung kann quantitativ als Verhältnis der S-auf-1-Zerstörschwelle zur 1-auf-1-Zerstörschwelle angegeben werden. Siehe auch laserinduzierte Konditionierung.

5.2.8 Charakteristische Zerstörungskurve oder Ermüdungskurve

Laserinduzierte Zerstörschwelle, angegeben als Funktion der Laserbestrahlungsdosis (entweder in Pulsen oder Zeit).

ANMERKUNG Die charakteristische Zerstörungskurve wird auch als Ermüdungskurve oder S-N-Kurve bezeichnet.

5.2.9 Laserinduzierte Konditionierung

Erhöhung der Fähigkeit der Probe, der Laserleistung (-energie) standzuhalten, infolge wiederholtem und allmählich ansteigendem Bestrahlungsniveau der Laserquelle über einen zuvor bestrahlten Prüfort oder Prüfbereich.

ANMERKUNG Der Effekt kann quantitativ als Verhältnis der R(S)-auf-1-Zerstörschwelle zur 1-auf-1-Zerstörschwelle angegeben werden. Siehe auch laserinduzierte Ermüdung.

5.2.10 Konditionierungskurve

Graphische Darstellung der linearen oder nichtlinearen Zunahme oder des Verlaufs der Laserbestrahlung über den Prüfort oder Prüfbereich, bevor eine funktionelle Beschädigung erreicht wird.

ANMERKUNG Zur Veranschaulichung der Konditionierungseffekte können in der Konditionierungskurve graphische Marker hinzugefügt werden, die die funktionelle Zerstörschwelle (R(S)-auf-1; Rasterscan) und die Referenz-Zerstörschwelle (1-auf-1) sowie die Zerstörniveaus angeben.

5.3 Parameter für Prüfung, Probenahme und Berichterstattung

5.3.1 Typischer Puls

Laserpuls mit zeitlichen und räumlichen Formen, die die mittleren Eigenschaften von Pulsen in einer Pulsfolge (Burst) oder Dauerstrichbestrahlung darstellen.

5.3.2 Bestrahlungsniveau der Laserquelle L

Größe, angegeben in Maßeinheiten der Laserbestrahlung je typischer Puls, die zur Bestrahlung des Prüfortes oder des Scanbereiches verwendet wird. Das Bestrahlungsniveau der Laserquelle wird in der Regel während der Prüfung bei der Untersuchung von Proben verändert. Bei Bestrahlung mit mehreren Pulsen oder bei Dauerstrichbestrahlung ist das Bestrahlungsniveau immer an die Gesamtstrahlungsdosis (angegeben in aufgebrauchte Laserpulse oder Bestrahlungszeit) gebunden.

5.3.3 Maximale Bestrahlungsdosis

Maximale Bestrahlungsmenge, die für ein gewähltes Bestrahlungsniveau der Laserquelle auf einen einzelnen Prüfort aufgebracht wird, wenn keine Beschädigung festgestellt wird.

ANMERKUNG Die Menge der Laserstrahlung wird in der Regel als gesamte angewandte Laserenergie angegeben, kann jedoch aus praktischen Gründen auch in Form von aufgebrauchten Laserpulsen oder Dauer der kontinuierlichen Bestrahlungszeit in Kombination mit den ausgewählten Maßeinheiten des Bestrahlungsniveaus der Laserquelle dargestellt werden.

5.3.4 Aufgebrachte Bestrahlungsdosis

Menge der Bestrahlung, die für ein gewähltes Bestrahlungsniveau der Laserquelle auf einen einzelnen Prüfort bis zum Zeitpunkt der festgestellten Beschädigung aufgebracht wird.

ANMERKUNG Bei wiederholter gepulster Bestrahlung ist $N_{\min}$ die Anzahl der einfallenden Laserpulse, die erforderlich ist, um eine nachweisbare Beschädigung zu verursachen; bei Dauerstrich- oder Quasidauerstrichbestrahlung ist TTF die Zeit bis zum Versagen der Zeit, die erforderlich ist, um eine nachweisbare Beschädigung zu verursachen.

5.3.5 Prüfebene

Ebene mit tangentialer Ausrichtung zur Probenoberfläche, die den Schnittpunkt der optischen Achse des Prüflaserstrahls mit der Probenoberfläche enthält.

ANMERKUNG Bei gekrümmten Oberflächen können mehrere Prüfebene erforderlich sein, um die Zerstörungsprüfung durchzuführen.

5.3.6 Gesamtbestrahlungsfläche $A_{90\%}$

AOI-angepasste Gesamtbestrahlungsfläche je Prüfung bei dem höchsten Bestrahlungsniveau ohne Beschädigung, unterhalb des niedrigsten Niveaus der beobachteten Beschädigung oder dem für die Annahmeprüfung festgelegten Niveau.

6 Probenahme

Für die Prüfung beschichteter Komponenten darf entweder die funktionelle Komponente oder eine Vergleichsprobe geprüft werden. Wenn eine Vergleichsprobe für die Prüfung ausgewählt wird, müssen das Substratmaterial und die Oberflächenbeschaffenheit mit denen der funktionellen Komponente identisch sein. Sind die funktionellen Komponenten beschichtet, müssen die Vergleichsproben im selben Beschichtungsdurchgang beschichtet worden sein wie die funktionelle Komponente. Für die Probe muss die Nummer des Beschichtungsdurchgangs und das Datum angegeben werden. Bei ungleichmäßiger Dickenverteilung innerhalb der Beschichtungskammer muss die Position der Vergleichsprobe genau definiert und dokumentiert werden, um den Beschichtungsdurchgang nach A.1.1 zu repräsentieren.

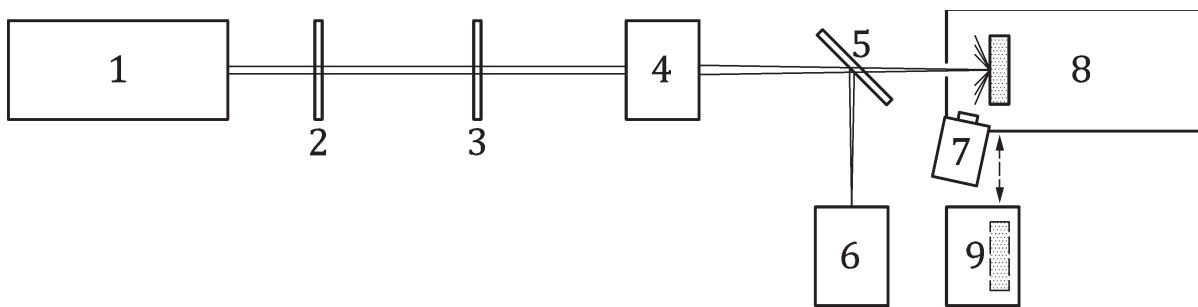
Außerdem sollten die Proben vor der Prüfung in einer staubfreien Umgebung mit Sorgfalt gehandhabt und verpackt werden, um jede mögliche Kontamination zu vermeiden. Es wird empfohlen, die optischen Oberflächen vor Kontakt mit Gegenständen zu schützen, die eine Verunreinigung durch Partikel oder Chemikalien verursachen könnten.

7 Prüfverfahren

7.1 Kurzbeschreibung

Der grundsätzliche Aufbau für die Prüfung der laserinduzierten Beschädigung ist in Bild 1 dargestellt. Die Laserstrahlung einer gut charakterisierten, stabilen Laserquelle wird mit einem variablen Abschwächer auf das gewünschte maximale Bestrahlungsniveau (Pulsenergie oder -leistung) eingestellt. Der Strahl wird auf die Probe gerichtet, die sich im oder in der Nähe des Brennpunktes (oder der Abbildungsebene) eines Fokussiersystems befindet.

Die Probe wird in einem beweglichen Probenhalter (Manipulator) befestigt, der dazu dient, verschiedene Prüforte im Strahl zu positionieren und den Einfallswinkel einzustellen. Der Polarisationszustand wird mit einer geeigneten Verzögerungsplatte eingestellt. Der einfallende Laserstrahl durchläuft einen Strahlteiler, der einen Teil der Laserstrahlenergie zur Strahldiagnostikeinheit ablenkt. Die Strahldiagnostikeinheit ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung der Gesamtpulsenergie sowie der räumlichen und zeitlichen Profile.



Legende

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 Lasersystem | 6 Strahldiagnostikeinheit |
| 2 variabler Abschwächer | 7 Online-Beschädigungsdetektor |
| 3 Verzögerungsplatte (Wellenplatte) | 8 Probenbehälter mit kontrollierten Umwelteigenschaften |
| 4 Fokussiersystem | 9 Offline-Zerstörungsprüfsystem |
| 5 Strahlenteiler | |

Bild 1 — Grundlegendes Prinzip bei der Prüfung der laserinduzierten Beschädigung

Die Probe wird bezüglich des Laserstrahls unter festgelegtem Einfallswinkel an einer bestimmten Stelle positioniert. Je nach Prüfverfahren werden die Prüforte auf der Probe mit einzelnen Laserpulsen, Pulsfolgen (Bursts) mit einer konstanten Pulsfolgefrequenz oder mit kontinuierlicher Bestrahlung bestrahlt. Die Probe wird in einem Halter befestigt. Mit Ausnahme des Raster-scans erfolgt die Bestrahlung auf eine stationäre Probe. Um ein Ausglühen oder eine Kreuzkontamination durch Ablationsprodukte des nicht belichteten Prüfbereiches zu vermeiden, wird empfohlen, dass der Abstand zwischen benachbarten Prüforten größer ist als das Dreifache des Laserstrahldurchmessers d_T . Die Werte von laserinduzierten Zerstörschwellen sind von den Betriebsparametern des für die Prüfung angewendeten Lasersystems abhängig. Dementsprechend müssen die Laserbestrahlungsbedingungen (Pulsfolgefrequenz, Dauer, Wellenlänge, Polarisierung, AOI) den Zeichnungsangaben entsprechen oder ähneln. Bei höheren Pulsfolgefrequenzen geht der Beschädigungsmechanismus in den Quasidauerstrichbereich über. Eine längere Dauerstrich- oder Quasidauerstrichexposition kann eine Wärmeeinflusszone um den untersuchten Prüfort erzeugen. Die Vorerwärmung unbestrahlter benachbarter Prüforte kann zu Ausglüheffekten führen, die ebenfalls eine Erhöhung des Schwellenwertes bewirken. Die gewählten Laserbestrahlungsbedingungen müssen im Prüfbericht angegeben werden. Überprüfte Skalierungsgesetze (sofern bekannt) können zur Abschätzung der Zerstörschwelle einer festgelegten Fehlerart unter leicht abweichenden Versuchsbedingungen verwendet werden, jedoch kann die Skalierung ohne vorherige Kenntnis nicht universell angewendet werden. Für eine zuverlässige Prüfung der nicht-deterministischen Beschädigung muss ein statistisch signifikanter Prüfbereich ($A_{90}\%$) bestrahlt werden. Für die Bestimmung der intrinsischen Beschädigung sind weniger Prüforte erforderlich. Die Bestimmung der Zerstörschwelle beruht auf dem vollständigen Datensatz, der während der gesamten Prüfung und der anschließenden mikroskopischen Untersuchung gesammelt wurde, und nicht auf dem Zustand der Beschädigung eines einzigen Prüfortes. Die Zerstörschwellen werden in Maßeinheiten des ausgewählten Bestrahlungsniveaus angegeben.

7.2 Prüfeinrichtung

7.2.1 Laser

Es ist ein Laser erforderlich, der einen Strahl mit einem reproduzierbaren Gaußschen (ISO 11146-1 und ISO 11146-2) oder Flat-Top-förmigem Raumprofil (nach ISO 13694) erzeugt. Die Pulsenergie oder die mittlere Leistung muss während der Messung überwacht werden. Beim Prüfverfahren mit mehreren Pulsen muss die Pulsfolgefrequenz innerhalb einer Fehlergrenze von 1 % konstant gehalten werden. Für die Strahlparameter müssen Stabilitätskriterien ermittelt und in einer Fehlerbilanz aufgezeichnet werden.

7.2.2 Variabler Abschwächer und Strahlführungssystem

Bei gepulsten Lasern, die eine konstante Leistung oder Energie erzeugen, muss die Laserstrahlung mit einer Einrichtung (Abschwächer) auf das geforderte Niveau abgeschwächt werden, das hinsichtlich Transmission und Abbildungsverhalten driftfrei ist.

Das Strahlführungssystem und der Abschwächer dürfen die Strahlparameter nicht beeinflussen. Insbesondere darf der Polarisationszustand des Laserstrahls durch das Strahlführungssystem nicht verändert werden.

7.2.3 Fokussiersystem

Die Gestaltung des Fokussiersystems sollte auf die spezifischen Anforderungen des Lasersystems und des Zerstörungsprüfungsverfahrens zugeschnitten sein, wobei auch mögliche Einschränkungen im Zusammenhang mit der Probe und der Umgebung zu berücksichtigen sind. Es ist äußerst wichtig, dass Probleme wie Selbstfokussierung, chromatische Aberrationen, Bandbreitenbeschränkungen, thermische Linsenbildung oder Filamentierung innerhalb des Strahlführungs- und Fokussiersystems oder andere Auswirkungen auf die Bestrahlung der Probe vermieden werden. Außerdem muss die Unversehrtheit der Abbildungseigenschaften des Fokussiersystems während des gesamten Prüfverfahrens erhalten bleiben.

Bei Gaußschen Strahlen ist es zweckmäßig, Optiken mit einer Blendenöffnung zu verwenden, die mindestens dem dreifachen Strahldurchmesser beim Eintritt in das Fokussiersystem entspricht. Die Prüfebene sollte sich am Ort oder in der Nähe der Strahltaile befinden. Bei Flat-Top-förmigen Laserstrahlen ist es zweckmäßig, die Prüfoberfläche in der Abbildungsebene eines Fokussiersystems zu positionieren. Der effektive Strahldurchmesser muss dann am Ort der Prüfebene oder einer gleichwertigen Ebene geschätzt und später im Prüfbericht aufgezeichnet werden.

Bei der Prüfung der Zerstörschwelle auf Oberflächen der Probe, bei denen eine fehlerbedingte Schädigung dominiert, wird ein Fokussiersystem mit einer effektiven f -Zahl von mindestens 50 und einem Strahldurchmesser von mindestens 0,2 mm in der Prüfebene empfohlen. Bei energie- oder leistungseingeschränkten Lasersystemen, deren maximales Bestrahlungsniveau aus technischen Gründen eingeschränkt ist, können auch kleinere Strahldurchmesser verwendet werden, wobei jedoch Strahldurchmesser von weniger als 0,01 cm vermieden werden sollten. Um die statistischen Bestrahlungseffekte eines kleinen Strahls zu kompensieren, kann die Anzahl der Prüforte je Bestrahlungsniveau so erhöht werden, dass mit einem kleineren Strahldurchmesser eine vergleichbare (oder genormte) Gesamtbestrahlungsfläche $A_{90\%}$ erreicht wird.

Bei der Abschätzung der intrinsischen oder deterministischen Zerstörschwelle stark absorbierender Oberflächen sind bei Unterdrückung nichtlinearer Ausbreitungseffekte Strahldurchmesser kleiner als 0,01 cm zulässig.

Bei der Prüfung intrinsischer Zerstörschwellen der Festkörpermasse von durchscheinenden Materialien müssen hochkonvergente Laserstrahlen verwendet werden. Zur Vermeidung von Selbstfokussierungseffekten muss der Laserstrahl auf einen Durchmesser fokussiert werden, der mit der Wellenlänge der Laserstrahlung vergleichbar ist. Für derartige Experimente können auch Bessel-Strahlen verwendet werden, die von Natur aus nicht selbstfokussierend sind. In beiden Fällen sind genaue Messungen der maximalen Bestrahlungsstärken in Achsenrichtung erforderlich. Im Falle einer scharfen Fokussierung (z. B. bei der Zerstörungsprüfung in der Festkörpermasse) ist es zweckmäßig, kaustische Messungen in der Nähe der Prüfebene vorzunehmen. Die Eigenschaften des Strahls werden an mehreren Stellen entlang seines Ausbreitungswegs bewertet. Die interpolierte effektive Fläche wird dann verwendet, um den Grad der Bestrahlung in der Prüfebene unter Berücksichtigung des Einflusses des Brechungsindex zu bewerten.

In Proben mit parallelen Oberflächen können Kohärenzeffekte auftreten und die Messung beeinträchtigen. Diese Effekte sollten durch angemessene technische Maßnahmen eliminiert werden, wie z. B. durch die Auswahl keilförmiger Proben oder durch Neigen der Probe.

7.2.4 Probenhalter

Die Prüfeinrichtung muss mit einem beweglichen Probenhalter ausgerüstet sein, der eine präzise Positionierung der Prüforte auf der Probe mit einer für die Probengröße, den Strahlungsdurchmesser und den Abstand zwischen den Prüforten geeigneten Genauigkeit erlaubt. In besonderen Fällen, in denen die Probe aus dem Probenfach entnommen und außerhalb des Lasergeräts analysiert werden muss, muss sie vor Fortsetzung der Prüfung wieder exakt an derselben Stelle positioniert werden.

7.2.5 Systeme zur Beschädigungsdetektion und -prüfung

Bei Prüfverfahren, die mehr als einen Puls je Prüfort oder lang anhaltende Dauerstrich-Bestrahlung umfassen, muss ein geeignetes Online-Detektionssystem installiert werden. Es wird empfohlen, das System zur Online-Beschädigungsdetektion mit der Möglichkeit oder einem Verfahren zu kombinieren, die anschließende Bestrahlung zu unterbrechen und den Pulszähler (Timer) zu stoppen, wenn eine Beschädigung in der Frühphase festgestellt wird, um eine Kontamination der Probe durch verschiedene Ablationsprodukte zu verhindern. Für die Online-Beschädigungsdetektion darf jede geeignete Detektionstechnik angewendet werden. Geeignete Detektionstechniken (Online-Mikroskopie, photoakustische, photothermische, Streuänderungs-; oder plasmabasierte Detektoren) sind in ISO/TR 21254-4 beschrieben.

ANMERKUNG 1 Bei Funktionellen Rasterscanprüfungen wird das System zur Online-Beschädigungsdetektion üblicherweise im Dokumentationsmodus ohne Unterbrechung der Laserbestrahlungsfolge betrieben.

Die von Systemen zur Online-Beschädigungsdetektion erzeugten Informationen über Pulse oder Zeit, die erforderlich sind, um eine erkennbare Beschädigung auszulösen, die nicht dem klassischen Zerstörkriterium entspricht, können nur für die Charakterisierung der funktionellen Zerstörschwellen berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der klassischen Zerstörschwellen sollte stattdessen ein auf DIC-Mikroskopie beruhendes Prüfsystem verwendet werden.

ANMERKUNG 2 Verschiedene Beschädigungsdetektions- und Untersuchungstechniken sind unterschiedlich empfindlich gegenüber verschiedenen Fehlerarten und können nicht gleichzeitig innerhalb desselben Datensatzes zur Bestimmung von Zerstörschwellen verwendet werden.

Ein geeignetes System zur mikroskopischen Offline-Prüfung muss auch für die Untersuchung der Prüftorte oder des Oberflächenzustands vor und nach der Laserbestrahlung verwendet werden. Die Spezifikation eines speziellen Prüfsystems muss im Prüfbericht beschrieben werden. Für die Prüfung von Beschädigungen auf der Oberfläche und in der Festkörpermasse werden Reflexions- und Transmissionsverfahren empfohlen. Es wird empfohlen, „Vorher“- und „Nachher“-Bilder in digitalem Format zu Dokumentations- und Vergleichszwecken zu speichern. Die 150-fache Gesamtvergrößerung des mikroskopischen DIC-Prüfsystems entspricht der klassischen Definition von Beschädigungen und früheren Fassungen dieser Norm. Optische Prüfsysteme müssen mit einer bildgebenden Optik und geeigneten kameragestützten Sensoren mit einem Auflösungsvermögen von mindestens $1,1 \mu\text{m}$ (Objektiv mit $\text{NA} = 0,25$, DIC) oder besser ausgerüstet sein.

ANMERKUNG 3 Einzelheiten zu einem mikroskopischen Prüfsystem sind in A.5 beschrieben.

7.2.6 Strahldiagnostikeinheit

7.2.6.1 Gesamtpulsenergie und mittlere Leistung

Das Diagnostikpaket muss mit einem kalibrierten Detektor zur Messung des auf die Prüfebene auftreffenden Bestrahlungsniveaus der Laserquelle ausgestattet sein. Das Diagnosepaket muss in der Lage sein, entweder die Pulsenergie oder die mittlere Strahlungsleistung zu bestimmen. Das verwendete Messgerät muss auf einen nationalen Standard mit einer absoluten Messunsicherheit von $\pm 5 \%$ oder besser rückführbar sein. Bei Lasersystemen mit hohen Folgefrequenzen darf die Gesamtpulsenergie durch Messen der mittleren Leistung P_{av} und der Pulsfolgefrequenz f_{p} bestimmt werden. In diesem Fall ist die Pulsenergie Q gegeben durch:

$$Q = \frac{P_{\text{av}}}{f_{\text{p}}} \quad (9)$$

7.2.6.2 Zeitliches Profil

Das Diagnostikpaket muss zur Ermittlung der Pulsdauer ein geeignetes System zur Analyse des zeitlichen Profils des Lasers enthalten. Das zeitliche Profil $P(t)$ muss integriert werden, um das Verhältnis von Gesamtpulsenergie Q zur Pulsspitzenleistung P_{pk} zu bestimmen. Dieses Verhältnis ist als effektive Pulsdauer τ_{eff} festgelegt, gegeben durch:

$$\tau_{eff} = \frac{Q}{P_{pk}} = \frac{\int_0^{\infty} P(t) dt}{P_{pk}} \quad (10)$$

Die oberen Grenzwerte für die zeitliche Auflösung der Pulsdaueremessung dürfen 10 % der effektiven Pulsdauer nicht überschreiten.

Bei Lasern, die im fs-Bereich arbeiten, müssen alternative Verfahren (z. B. Autokorrelation oder Kreuzkorrelation) verwendet werden. Die in 7.2.1 genannten Mindestspezifikationen müssen eingehalten werden.

7.2.6.3 Räumliches Profil

In sämtlichen Fällen muss das räumliche Profil in der Prüfebene oder einer äquivalenten Ebene bei senkrechtem Einfall analysiert werden. Das Diagnostikpaket muss mit einem positionsempfindlichen Detektor oder einer Detektoranordnung zur Messung des zweidimensionalen räumlichen Profils $H(x, y)$ für gepulste Laser oder $E(x, y)$ für Dauerstrichlaser (CW-Laser) oder Quasidauerstrichlaser (q-CW-Laser) mit einer räumlichen Auflösung von 1,5 % des Strahldurchmessers oder besser ausgestattet sein. Es kann eine lichtempfindliche Anordnung wie z. B. ein CCD (en: charge-coupled device) oder CMOS (en: complementary metal-oxide-semiconductor) verwendet werden. Alle Strahlparameter müssen nach ISO 11146-1 und ISO 11146-2 bestimmt werden. Die effektive Fläche $A_{T,eff}$ in der Prüfebene muss wie folgt bestimmt werden:

$$A_{T,eff} = \frac{Q}{H} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) dx dy}{H_{max}} \quad (11)$$

Für ein Dauerstrichlaser- oder ein Quasidauerstrichlasersystem ist die effektive Fläche $A_{T,eff}$ des Strahls gegeben durch:

$$A_{T,eff} = \frac{P}{E} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) dx dy}{E_{max}} \quad (12)$$

In Fällen, in denen Langzeitdegradationseffekte untersucht werden und die mittlere Spitzenbestrahlungsstärke als Einheit für das Bestrahlungsniveau der Laserquelle ausgewählt wird, muss die Stabilität der Strahlausrichtung bei der Berechnung der zeitlich gemittelten effektiven Fläche $\bar{A}_{T,eff}$ berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird empfohlen, ein zeitgemitteltes zweidimensionales Profil $\bar{E}(x, y)$ zu verwenden:

$$\bar{E}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(x, y) \quad (13)$$

Dabei bezeichnet i ein bestimmtes momentanes zweidimensionales Profil, das während der kurzfristigen Bestrahlungsperiode aufgenommen wurde. N steht für eine Reihe mehrfacher Bestrahlungen. N muss ausreichend groß sein, um die für die Bestrahlungszeit eines einzelnen Prüfortes relevanten Eigenschaften der Strahlrichtungsstabilität zu charakterisieren. Aus dem zeitgemittelten zweidimensionalen Profil $\bar{E}(x, y)$ wird die maximale Amplitude $\bar{E}_{max}$ extrahiert, um die zeitgemittelte effektive Fläche zu berechnen:

$$\bar{A}_{T,eff} = \frac{P_{av}}{E} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}(x, y) dx dy}{\bar{E}_{max}} \quad (14)$$

Der effektive Strahldurchmesser in der Prüfebene wird aus der effektiven Fläche des Strahls, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gemessen, berechnet:

$$d_{T,\text{eff}} = 2 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x,y) dx dy}{\pi H_{\text{max}}}} \quad (15)$$

$$d_{T,\text{eff}} = 2 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x,y) dx dy}{\pi E_{\text{max}}}} \quad (16)$$

Für den Sonderfall eines kreisförmigen Flat-Top-Strahlprofils mit einem Durchmesser d_{100} und der maximalen Fluenz H_{max} ist die effektive Fläche gegeben durch:

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{Q}{H} = \frac{H_{\text{max}} \pi d_{100}^2}{4 H_{\text{max}}} = \frac{1}{4} \pi d_{100}^2 \quad (17)$$

Bei einem fokussierten Gaußschen Strahl mit einem Strahldurchmesser $d_{86,5}$ und der maximalen Fluenz H_{max} ist die effektive Fläche gegeben durch:

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{Q}{H} = \frac{H_{\text{max}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-8 \frac{x^2+y^2}{d_{86,5}^2}} dx dy}{H_{\text{max}}} = 2\pi \int_0^{\infty} e^{-\frac{8r^2}{d_{86,5}^2}} r dr = \frac{1}{8} \pi d_{86,5}^2 \quad (18)$$

Mit der Definition des zweiten Moments der Fluenzverteilungsfunktion $H_{(x,y,z)}$ am Ort z :

$$\sigma^2(z) = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} r^2 H(r,\varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} H(r,\varphi) r dr d\varphi} \quad (19)$$

und der Definition des Strahldurchmessers d_{σ} als eine Funktion des zweiten Moments:

$$d_{\sigma}(z) = 2\sqrt{2}\sigma(z) \quad (20)$$

lässt sich die effektive Fläche wie folgt beschreiben:

— Flat-Top-förmiges Strahlprofil:

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{1}{4} \pi d_{100}^2 = \frac{1}{4} \pi d_{\sigma}^2 = 2\pi\sigma^2; d_{100} = d_{\sigma} \quad (21)$$

— Gaußsches Strahlprofil:

$$A_{T,\text{eff}} = \frac{1}{8} \pi d_{86,5}^2 = \frac{1}{8} \pi d_{\sigma}^2 = \pi\sigma^2; d_{86,5} = d_{\sigma} \quad (22)$$

7.2.6.4 Typischer Puls

Zur Ermittlung des räumlichen Profils eines typischen Pulses muss ein signifikanter Anteil der Anzahl von Pulsen in einer Pulsfolge vom räumlichen Strahlprofilmesssystem aufgezeichnet werden. Das räumliche Profil des typischen Pulses ist durch die mittlere Verteilung der Leistungsdichten definiert, die für die Pulsfolge aufgezeichnet werden. Das zeitliche Profil und die Energie des typischen Pulses ergeben sich aus den entsprechenden Mittelwerten aller Pulse einer Pulsfolge, die für die Prüfung bei einem bestimmten Energieniveau

aufgebracht werden. Der Prüfbericht muss eine Beschreibung des zeitlichen und räumlichen Profils des typischen Pulses enthalten.

Zur Auswertung des zeitlichen Profils darf die Strahlungsleistung $P_j(t_i)$ des Lasers bei abstandsgleichen Zeitkoordinaten t_i eines jeden Pulses ermittelt werden. Die Position eines Pulses in einer Pulsfolge N_p ist durch die Zählvariable j gekennzeichnet. Eine Erfassung jedes Pulses muss jeweils an der ersten Zeitkoordinate t_1 beginnen, bei der eine Leistung ungleich Null gemessen wird. Mit Hilfe dieses Messvorgangs kann das zeitliche Profil $P_{tp}(t_i)$ des typischen Pulses als Mittelwert aller Pulse einer Prüfreihe N_p errechnet werden:

$$P_{tp}(t_i) = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} P_j(t_i) \quad (23)$$

Die Energie des typischen Pulses einer bestimmten Pulsfolge darf als die Summe der zu jedem Zeitintervall $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ gehörenden Leistungsinhalte angegeben werden:

$$Q_{tp} = \sum_{i=1}^{N_s} P_{tp}(t_i) \Delta t \quad (24)$$

Dabei ist N_s die Anzahl der Zeitintervalle, die erforderlich sind, um die vollständige zeitliche Form des typischen Pulses zu beschreiben.

Die zu erwartende mittlere Leistung $P_{av,id}$ für eine ideale Pulsfolge ergibt sich aus:

$$P_{av,id} = Q_{tp} f_p \quad (25)$$

Durch den Vergleich der von der Energie eines typischen Pulses abgeleiteten mittleren Leistung mit der gemessenen mittleren Leistung P_{av} lassen sich die Genauigkeit und die Stabilität des Lasers bewerten. Die Stabilität des räumlichen Profils einer Pulsfolge kann durch Aufzeichnung des zeitlichen Verhaltens der lokalen Bestrahlung an ausgewählten Stellen im räumlichen Strahlprofil bewertet werden.

7.2.6.5 Prüfparameter

Die Prüfeinrichtung muss durch die folgenden Parameter charakterisiert sein:

- a) Wellenlänge λ ;
- b) Einfallswinkel α ;
- c) Art, Ausrichtung und Grad der Polarisation p ; alle nicht kategorischen Polarisationszustände sollten notiert werden.
- d) Strahldurchmesser in der Prüfebene d_T ;
- e) effektiver Strahldurchmesser in der Prüfebene $d_{T,eff}$;
- f) Pulsdauer τ_{FWHM} ;
- g) effektive Pulsdauer τ_{eff} ;
- h) Pulsfolgefrequenz f_p .

7.3 Vorbereitung der Proben für die Prüfung

Die Wellenlänge, der Einfallswinkel und die Polarisation der Laserstrahlung müssen nach den Herstellerangaben für den bestimmungsgemäßen Gebrauch ausgewählt werden. Sind für diese Parameter Wertebereiche