

DIN EN 1011-6

ICS 25.160.10

Einsprüche bis 2017-08-31
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1011-6:2006-03

Entwurf

**Schweißen –
Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe –
Teil 6: Laserstrahlschweißen;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1011-6:2017**

Welding –
Recommendation for welding of metallic materials –
Part 6: Laser beam welding;
German and English version prEN 1011-6:2017

Soudage –
Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques –
Partie 6: Soudage par faisceau laser;
Version allemande et anglaise prEN 1011-6:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-06-30 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- 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 nas@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 Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 93 Seiten

DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1011-6:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 121 „Qualitätsmanagement für das Schweißen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitssausschuss NA 092-00-21 AA „Laserstrahlschweißen und -schneiden (DVS AG V 9.2)“ im DIN-Normenausschuss Schweißtechnik (NAS).

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.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1011-6:2006-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Normative Verweisungen und Literaturhinweise wurden aktualisiert;
- b) 12.3 (Montage und Spannvorrichtungen) wurde modifiziert;
- c) Anhang A (Anlagen) wurden Faserlaser hinzugefügt.

Schweißen — Empfehlungen für das Schweißen von metallischen Werkstoffen — Teil 6: Laserstrahlschweißen

Soudage — Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques — Partie 6 : Soudage par faisceau laser

Welding — Recommendations for welding of metallic materials — Part 6: Laser beam welding

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.8l

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz	7
5 Qualitätsanforderungen	7
6 Einrichtungen	8
6.1 Allgemeines	8
6.2 Abnahmeprüfungen	8
6.3 Instandhaltung und Kalibrierung	8
7 Qualifizierung des Bedienpersonals	8
8 Schweißanweisung	9
9 Schweißverfahrensprüfung	9
10 Schweißzusätze	9
10.1 Zusatzwerkstoffe	9
10.2 Gase	9
11 Konstruktion	10
11.1 Allgemeine Hinweise für die Konstruktion oder das Bauteil	10
11.2 Nahtformen	10
11.3 Nahtvorbereitung	10
12 Laserstrahlschweißen	11
12.1 Merkmale	11
12.1.1 Verfahrensvarianten	11
12.1.2 Energieübertragung	12
12.1.3 Strahlpulsschweißen	12
12.1.4 Strahloszillation	12
12.1.5 Rampen	12
12.1.6 Strahlfokussierung	13
12.1.7 Schutzgas	13
12.1.8 Verwendung von Zusatzwerkstoffen	13
12.1.9 Hybridprozesse	13
12.2 Vorteile und Einschränkungen	13
12.3 Montage und Spannvorrichtungen	14
12.4 Prozesssteuerung	14
12.5 Inspektion und Prüfen	14
12.6 Unregelmäßigkeiten	14
Anhang A (informativ) Einrichtungen	15
A.1 Beschreibung des Laserstrahlprozesses	15
A.1.1 Grundlagen	15
A.1.2 Baugruppen	15

A.2	Laserstrahlquellen.....	16
A.2.1	CO₂-Laser	16
A.2.2	Lampengepumpte Nd:YAG-Laser	16
A.2.3	Diodengepumpte Nd:YAG-Laser	17
A.2.4	Hochleistungs-Array-Diodenlaser	17
A.2.5	Faserlaser	18
A.2.6	Andere Lasertypen.....	18
A.3	Strahlführung, -formung und -fokussierung	19
A.3.1	Strahlführung.....	19
A.3.2	Strahlformung (Fokusoptik)	19
A.4	Einrichtungen zum Bewegen des Laserstrahls und des Werkstückes.....	23
A.5	Vorrichtungen zum Spannen der Werkstücke	24
A.6	Kühlsysteme	24
A.7	Steuerungssysteme.....	24
Anhang B (informativ) Laserstrahleigenschaften.....		25
Anhang C (informativ) Informationen über die Schweißeignung metallischer Werkstoffe		27
C.1	Allgemeines	27
C.2	Stahl und Eisenlegierungen	27
C.2.1	Allgemeines	27
C.2.2	C-Mn-Stähle und Baustähle	28
C.2.3	Legierte Stähle	28
C.2.4	Nichtrostende Stähle	28
C.2.5	Gusseisen	28
C.2.6	Weicheisen.....	28
C.3	Nickellegierungen	29
C.4	Aluminium und Magnesiumlegierungen	29
C.5	Kupfer und Kupferlegierungen	29
C.6	Hochschmelzende und reaktive Metalle.....	29
C.7	Titan und Titanlegierungen.....	30
C.8	Unterschiedliche Metalle	30
C.9	Nichtmetalle	30
Anhang D (informativ) Informationen über Ursachen von Schweißnahtunregelmäßigkeiten und Gegenmaßnahmen		31
Anhang E (informativ) Strahlsteuerung und -überwachung.....		34
E.1	Allgemeines	34
E.2	Fokuspunkt.....	34
E.3	Justierung von Leistungs- und Pilotlaserstrahl.....	34
E.4	Strahlleistung.....	35
E.5	Leistungsdichtevertelung	35
E.6	Düsenjustierung.....	36
E.7	Strahlpulsen	36
E.8	Handhabungsmittel, Führungen usw.....	36
Anhang F (informativ) Laserstrahlverfahren		37
F.1	Laserstrahlschneiden	37
F.1.1	Merkmale	37
F.2	Laserstrahlbohren	39
F.2.1	Merkmale	39
F.2.2	Vorteile und Einschränkungen.....	39
F.2.3	Oberflächenbehandlung	39
F.3	Laserstrahl-Randschichtbehandlung.....	39
F.3.1	Merkmale	39
F.3.2	Vorteile und Einschränkungen.....	40
F.3.3	Oberflächenbehandlung	40

F.4	Besonderheiten des Laserstrahlplattierens	40
F.4.1	Verfahrensvarianten	40
F.4.2	Vorteile und Einschränkungen	40
F.4.3	Oberflächenbehandlung	40
F.5	Laserstrahlmarkieren und -gravieren	41
F.5.1	Merkmale	41
F.5.2	Vorteile und Einschränkungen	41
F.5.3	Oberflächenbehandlung	41
	Literaturhinweise	42

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1011-6:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 121 „Schweißen und verwandte Verfahren“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 1011-6:2005 ersetzen.

Im Vergleich zur vorhergehenden Ausgabe EN 1011-6:2005 wurden folgende technische Änderungen vorgenommen:

- a) Normative Verweisungen und Literaturhinweise wurden aktualisiert;
- b) 12.3 (Montage und Spannvorrichtungen) wurde modifiziert;
- c) Anhang A (Anlagen) wurden Faserlaser hinzugefügt.

Diese Norm besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: Allgemeine Anleitung für Lichtbogenschweißen;
- Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen;
- Teil 3: Lichtbogenschweißen von nichtrostenden Stählen;
- Teil 4: Lichtbogenschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen;
- Teil 5: Schweißen von plattierten Stählen;
- Teil 6: Laserstrahlschweißen;
- Teil 7: Elektronenstrahlschweißen;
- Teil 8: Schweißen von Gusseisen (in Vorbereitung im CEN/TC 190).

Einleitung

Diese Norm ist in mehreren Teilen erstellt worden, um die verschiedenen Arten schweißgeeigneter metallischer Werkstoffe erfassen zu können, die nach Europäischen Normen erzeugt werden.

Wenn diese Europäische Norm zu Vertragszwecken herangezogen wird, sollten die Bestell- oder Vertragspartner die notwendige Übereinstimmung mit dem entsprechenden Teil oder Anhang dieser Norm vereinbaren.

Diese Europäische Norm gibt allgemeine Anleitungen für eine einwandfreie Fertigung und Überwachung von Schweißungen und verwandter Prozesse. Sie beschreibt einige mögliche nachteilige Auswirkungen, die auftreten können, und gibt Hinweise, wie sie vermieden werden können. Sie ist allgemein anwendbar für das Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen und vereinzelt auch für nichtmetallische Werkstoffe. Sie kann ungeachtet der Fertigungsart angewendet werden, entsprechende Anwendernormen, Berechnungsregeln und Konstruktionsrichtlinien können jedoch zusätzliche Anforderungen enthalten. Angaben über zulässige Konstruktionsbeanspruchungen, Prüfverfahren und Bewertungsgruppen sind von den Betriebsbedingungen in der Fertigung abhängig und in der Norm nicht enthalten. Derartige Einzelheiten sollten den entsprechenden Anwendernormen entnommen oder zwischen den Vertragspartnern vereinbart werden.

Bei der Erstellung der Norm wurde vorausgesetzt, dass die Ausführung der enthaltenen Vorschriften entsprechend qualifiziertem, erfahrenem und geschultem Personal übertragen wird.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm enthält allgemeine Anleitungen für das Laserstrahlschweißen und verwandte Prozesse zum Fügen metallischer Werkstoffe für alle Erzeugnisformen (z. B. gegossen, gewalzt, strang-gepresst, geschmiedet).

ANMERKUNG Einige Anleitungen zum Laserstrahlschneiden, -bohren, -randschichtbehandeln und -plattieren werden in Anhang F beschrieben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Europäischen Norm erforderlich. 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).

EN ISO 3834-2, *Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen — Teil 2: Umfassende Qualitätsanforderungen (ISO 3834-2)*

EN ISO 3834-5, *Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen — Teil-5: Dokumente, deren Anforderungen erfüllt werden müssen, um die Übereinstimmung mit den Anforderungen nach ISO 3834-2, ISO 3834-3 oder ISO 3834-4 nachzuweisen (ISO 3834-5)*

EN ISO 11145:2016, *Optik und Photonik — Laser und Laseranlagen — Begriffe und Formelzeichen (ISO 11145:2016)*

EN ISO 15609-4, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Schweißanweisung — Teil 4: Laserstrahlschweißen (ISO 15609-4)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN ISO 11145:2016.

4 Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz

Eine allgemeine Prüfliste zum Umweltschutz beim Schweißen und bei verwandten Prozessen ist im CEN/TC 121 in Vorbereitung. Sie umfasst auch Anwendungen mit dem Laserstrahl.

Gegenüber dem Lichtbogenschweißen treten beim Laserstrahlschweißen zusätzliche Gefahren auf. Besondere Anweisungen sind z. B. in EN 60825-1 und EN ISO 11553-1 enthalten.

Hinweise auf die Sicherheit von Industrierobotern, die zum Schweißen Fokuseinrichtungen und/oder Schweißbauteile bewegen, sind in EN ISO 10218-1 und EN ISO 10218-2 enthalten.

5 Qualitätsanforderungen

Das Laserstrahlschweißen ist ein komplexer Prozess und erfordert besondere Steuerungen. Alle Prozessvorgänge sind numerisch steuerbar und erfordern das Programmieren jedes einzelnen Arbeitsschrittes. Die Maßnahmen sind in Übereinstimmung mit EN ISO 3834-2 und EN ISO 3834-5 zu überwachen.

Damit ist keine Verpflichtung zur Zertifizierung verbunden, jedoch sollte der Einsatz der Prozesssteuerungen in Übereinstimmung mit EN ISO 3834-2 und EN ISO 3834-5 erfolgen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Prozesssteuerung sind Qualitätsanforderungen an die Nahtfugegeometrie und andere entsprechende Anforderungen, die vor Beginn der Fertigung festzulegen

sind. Auf folgende Europäische Normen, die Nahtfugengeometrie und Qualitätskriterien spezifizieren, kann verwiesen werden.

Tabelle 1 — Qualitätskriterien

Anforderungen und Toleranzen	Nummer der Norm
Qualitätsanforderungen an Strahlschweißnähte	EN ISO 13919-1 EN ISO 13919-2
Qualitätsanforderungen an Schnittoberflächen	EN ISO 9013
Allgemeine Toleranzen	EN ISO 13920
Allgemeine Anforderungen	EN ISO 3834-2 und EN ISO 3834-5 enthalten Angaben und Hinweise, die vor Beginn einer Fertigung zu berücksichtigen sind. Anstelle von EN ISO 3834-2 und EN ISO 3834-5 kann EN 1011-1:2009, Anhang A als Richtlinie genutzt werden.

6 Einrichtungen

6.1 Allgemeines

Informationen über die einzelnen Einrichtungen zum Bearbeiten mit Laserstrahlschweißen sind den Unterlagen des Anlagenherstellers zu entnehmen. Einige Fachbücher und eine große Zahl von Fachaufsätzen stehen für Grundlageninformationen zur Verfügung. Anhang A enthält allgemeine Informationen über das Verfahrensprinzip und die Verfahrenstechnik. Anhang B beschreibt Eigenschaften von Laserstrahlen.

6.2 Abnahmeprüfungen

Abnahmeprüfungen von Laserstrahlanlagen werden in folgenden Normen geregelt, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2 — Abnahmeprüfungen

Anlagentyp	Nummer der Norm
CO ₂ -Laserstrahlanlage	EN ISO 15616-1, EN ISO 15616-2 und/oder EN ISO 15616-3
Nd:YAG-Laserstrahlanlage	EN ISO 22827-1, EN ISO 22827-2

6.3 Instandhaltung und Kalibrierung

Maßnahmen zur Instandhaltung sind nicht genormt. Hinweise sind den Angaben des Anlagenherstellers zu entnehmen. Die Grundlagen der Kalibrierung, Verifizierung und Validierung sowie Mindestanforderungen sind in EN ISO 17662 enthalten.

7 Qualifizierung des Bedienpersonals

Die Anforderungen an die Qualifizierung des Bedienpersonals für vollmechanische und automatische Schweißeinrichtungen sind in EN ISO 14732 festgelegt. Von den in dieser Europäischen Norm aufgeführten verschiedenen Prozessen eignet sich besonders die Funktionsprüfung als Grundlage für die Qualifizierung des Personals, das für das Bedienen und Einrichten von Laserstrahlanlagen verantwortlich ist. Bei einer

Funktionsprüfung legt der Bediener oder Einrichter seine Kenntnisse über das Arbeiten mit Schweißanweisungen und über das Einstellen, Überwachen und Kontrollieren der Laserstrahlanlage dar.

8 Schweißanweisung

Alle Einzelheiten für das Laserstrahlschweißen von Bauteilen sind in einer Schweißanweisung (WPS) nach EN ISO 15609-4 festzuhalten. Fertigungsanweisungen für das Schneiden, Bohren, Randschichtbehandeln und Plattieren sind nicht genormt. Falls erforderlich, können Hinweise aus der EN 15609-4 entnommen werden.

9 Schweißverfahrensprüfung

Eine formale Qualifikation der Laserstrahlverfahren wird für alle Anwendungen empfohlen und für viele Anwendungen vorgeschrieben. Die Schweißverfahrensprüfung kann, falls erforderlich, nach EN ISO 15614-11 durchgeführt werden. Sind Verfahrensprüfungen vor Fertigungsbeginn notwendig, so ist EN ISO 15613 anzuwenden. Qualifikationsprüfungen vor Fertigungsbeginn sind im Allgemeinen beim Schneiden, Bohren und Randschichtbehandeln üblich. EN ISO 15613 gibt dazu einige Hinweise.

Für Verfahrensprüfungen beim Laserstrahl-Schweißplattieren steht EN ISO 15614-7 zur Verfügung. Sind Verfahrensprüfungen vor Fertigungsbeginn notwendig, so ist EN ISO 15613 anzuwenden.

10 Schweißzusätze

10.1 Zusatzwerkstoffe

Zusatzwerkstoffe werden für das Laserstrahlplattieren und gelegentlich für das Laserstrahlschweißen eingesetzt. Das Hauptproblem ist, dass die für Laserstrahlanwendungen geeigneten Zusatzwerkstoffe kaum im Handel angeboten werden und dass auch keine entsprechenden Normen vorhanden sind. Die üblichen Lieferformen sind massive Runddrähte oder, besonders zum Schweißplattieren, Pulver. Es kommen folgende Bezugsmöglichkeiten in Betracht:

- handelsübliche Zusatzwerkstoffe für Metallschutzgas- und Wolfram-Inertgasschweißen. Es sollte beachtet werden, dass auch Fülldrähte geeignet sind. Geringe (Versuchs-) Fertigungen für Röhrendrähte sind für besondere Anwendungen möglich. Entsprechende Normen sind: EN ISO 14341, EN ISO 17632, EN ISO 636, EN ISO 21952, EN ISO 17634, EN ISO 14343, EN ISO 17633, EN ISO 16834, EN ISO 18276, EN ISO 24373, EN ISO 18273, EN ISO 18274;
- handelsübliche Zusatzwerkstoffe für das thermische Spritzen. Die üblichen Lieferformen sind Massivdrähte nach EN ISO 14919;
- Pulver für thermisches Spritzen nach EN 1274;
- Pulver für metallurgische Anwendungen.

10.2 Gase

Gase werden beim Laserstrahlschweißen zum Abschirmen und zum Unterdrücken des Plasmas verwendet. Sie unterstützen das Laserstrahlschneiden und sind beim Laserstrahlplattieren, -bohren und -markieren als Schutzgase erforderlich. Für CO₂-Laser ist eine kontinuierliche Gasversorgung mitunter unerlässlich.

Die einzige dafür maßgebende Norm ist EN ISO 14175. Diese Norm ist jedoch nicht für alle Gase geeignet, die für den Laserstrahlprozess verwendet werden. Im Bedarfsfall sind Zusammensetzung, Toleranzen usw. aller nicht genormten Gase gesondert zu spezifizieren.

11 Konstruktion

11.1 Allgemeine Hinweise für die Konstruktion oder das Bauteil

In erster Linie ist auf die Zugänglichkeit aller Nähte zu achten. Der Abstand zwischen Fokussierungseinrichtung und Nahtoberfläche kann dabei ein gewisser Vorteil sein. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Düsen für das Schutz- und Plasmagas in unmittelbare Nähe positioniert werden müssen. Darüber hinaus können Sensoren die Zugänglichkeit zusätzlich erschweren.

11.2 Nahtformen

Die Nahtform ist für das Laserstrahlschweißen von Bedeutung. Die normale I-Naht ist die übliche Form einer Verbindungsnaht. T-Stöße werden ähnlich geschweißt, eine vollständige Durchschweißung ist jedoch nicht erforderlich. Überlappverbindungen werden für das Punktschweißen verwendet.

Durch Laserstrahlschweißen können Bauteilkomponenten mit engen Maßtoleranzen gefügt werden. Bedingung ist, dass die Komponenten von einer Spannvorrichtung fixiert werden oder die Nahtfugen „selbstpositionierend“ sind.

Eine Schweißbadsicherung eignet sich als Spritzerschutz und unterdrückt die Bildung von Spikel und Randkerben.

Für Axialrundnähte an Bauteilen mit engen Maßtoleranzen werden Presspassungen der Paarung H7/r6 bis H7/n6 (EN ISO 286-2) empfohlen. Axialrundnähte mit Spielpassung sind unbedingt zu heften.

11.3 Nahtvorbereitung

Die Güte des Laserstrahlschweißens hängt von der Genauigkeit und Sauberkeit der Nahtvorbereitung ab. Die Nahtfugen können durch mechanisches Bearbeiten oder Schneiden vorbereitet werden. Dabei sollte die Oberflächenbeschaffenheit beachtet werden. Nahtfugen sollten gereinigt werden, falls sie durch Oxide, Öl, Fett, Kühlmittel und Farbe verschmutzt sind.

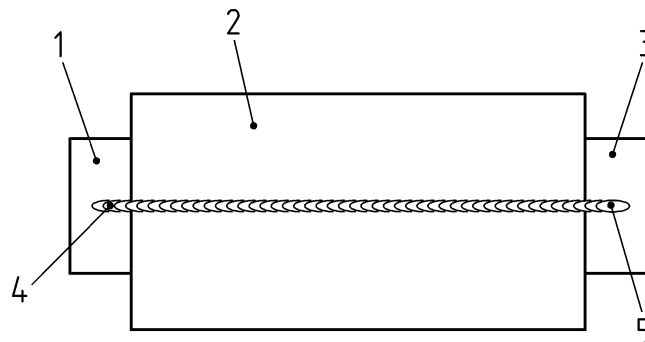
Die spezielle Reinigungsmethode ist abhängig vom Werkstoff, von der Bauteilgröße und den Qualitätsanforderungen sowie von den Betriebsbedingungen. Folgende Behandlungen können ausgeführt werden:

- manuelles Entfetten mit einem Lösungsmittel;
- Reinigen in einer geschlossenen Einrichtung unter Lösungsmitteldampf oder in einem Ultraschallbad;
- Vorbehandlung durch Dampfreinigen mit einem leicht alkalischen Zusatz, anschließend Trocknen;
- Neutralisieren durch Beizen, Waschen in destilliertem Wasser, Trocknen, kurzzeitiges Lagern;
- mechanisches Bearbeiten durch Schleifen, Bürsten usw.;
- Primer und ähnliche Schichten auf Stahl können mit einem defokussierten Laserstrahl durch Auftragen entlang der Naht vor dem Schweißen entfernt werden. Für diese Behandlung können besonders hohe Geschwindigkeiten von mehr als 100 mm/s eingesetzt werden.

Werkstoffrandschichten, die durch Aufkohlen, Anodisieren, Cadmieren, Nitrieren, Phosphatieren, Galvanisieren usw. entstanden sind, müssen in der Regel, möglichst durch mechanisches Bearbeiten der Nahtfuge und der angrenzenden Bereiche, entfernt werden.

Kann das Bauteil am Nahtanfangs- und -endbereich nicht bearbeitet werden, um den Endkrater zu entfernen, sollten Anlauf- bzw. Auslaufstücke zu verwendet werden, siehe Bild 1. Diese Maßnahme eignet

sich auch, um beim Schweißen den Wärmestau an den Werkstückenden zu unterdrücken. Die An-/Auslaufstücke sollten dazu durch Spannen oder Schweißen angebracht werden, damit ein thermisch ausreichender Kontakt mit dem Werkstück gewährleistet ist. Die Stücke sind anschließend zu entfernen.



Legende

- 1 Anlaufstück
- 2 Werkstück
- 3 Auslaufstück
- 4 Schweißnahtanfang
- 5 Schweißnahtende

Bild 1 — Werkstück mit An- und Auslaufstück zum Trennen des Schweißnahtanfangs und -endes

12 Laserstrahlschweißen

12.1 Merkmale

12.1.1 Verfahrensvarianten

Das Laserstrahlschweißen ist ein Schmelzschweißverfahren. Die Naht ist durch eine Schmelzzone und durch Wärmeeinflusszonen gekennzeichnet.

Das Laserstrahlschweißen wird oft als Tiefschweißverfahren durchgeführt. Zum Tiefschweißen ist ein Strahl hoher Leistungsdichte erforderlich, der den Werkstoff an der Strahlauftreffstelle verdampft. Der Strahl ist auf diese Weise (durch den Dampfdruck) in der Lage, einen tiefen zylinderähnlichen Kanal zu erzeugen. Die Kanalwände sind mit geschmolzenem Werkstoff überzogen. Bei entsprechender Prozesssteuerung bewegt sich der Kanal entlang der Nahtfuge. Die Wärme- und Materialausbreitung verläuft überwiegend zweidimensional. Der Werkstoff schmilzt an der Vorderseite des Kanals und bewegt sich zur Rückseite, wo er zum Schmelzgut erstarrt. Eine geringe Werkstoffmenge verdampft oder wird als Spritzer in Richtung Strahlachse herausgeschleudert. Dieser Werkstoffteil wird entlang der Achse des Strahls transportiert. Die Tiefschweißtechnik ist die übliche Verfahrensvariante zum vollständigen und teilweisen Durchschweißen bei großen Wanddicken.

Eine andere Variante ist das Wärmeleitungsschweißen. Dabei wird die Leistungsdichte im Strahl soweit verringert, dass kein Tiefschweißeffekt entsteht und die Wärme sich ähnlich wie beim Lichtbogenschweißen ausbreitet. Zum Wärmeleitungsschweißen wird der Strahl (mit geringer Leistung) defokussiert oder oszilliert. Beim Wärmeleitungsschweißen kann sich die Wärme dreidimensional ausbreiten, die im Schweißquerschnitt etwa kreisförmig erscheint, mit einer Breite an der Oberfläche, die ungefähr das Doppelte der Schmelzzonentiefe beträgt. Dadurch kann die Wärmeeinbringung über einen weiten Bereich verteilt werden, der zweimal breiter als die Schmelzzonentiefe ist. Eine ähnliche Technik wird beim Laserstrahl-Plattierungsschweißen verwendet, das in der Regel eine geringe Aufschmelzung verlangt.

Beim Punktschweißen bewegt sich der Arbeitskopf gegenüber dem Werkstück nicht. Die Schweißzeit je Punkt kann in Millisekunden gemessen werden. Für das Punktschweißen kommen üblicherweise gepulste

Laser zur Anwendung. Die sich ergebende Schweißverbindung ist eine Kombination aus Wärmeleitungs- und Tiefschweißtechnik.

12.1.2 Energieübertragung

Die Energie wird vom Laserstrahl in den Werkstoff übertragen, wobei der Werkstoff schmilzt und (bei der Tiefschweißtechnik) ein Dampfkanal entsteht. Die Energieübertragung wird in erster Linie von zwei Faktoren beeinflusst:

- (partielle) Reflexion der Strahlenergie an der Oberfläche des Werkstückes und der Schmelze;
- Entstehen von verdampfenden Elementen und/oder einer Plasmawolke (CO₂-Laser).

Laserstrahlen werden an der Werkstückoberfläche reflektiert. Die Höhe der reflektierten Energie hängt von der Oberflächenbeschaffenheit (im mikroskopischen Bereich), z. B. von der Oberflächenrauheit und Oberflächentemperatur, ab. Der Reflexionsanteil kann sehr hoch sein, bis zu 90 % bei polierten Werkstücken, bei Raumtemperatur und einer Wellenlänge von 1 µm. Der Anteil sinkt unter 50 % bei geringeren Wellenlängen und weniger reflektierenden Oberflächen. Ist der Strahl bei entsprechender Leistung allerdings in der Lage einen Tiefschweißeffect zu erzielen, so spielt die Reflexion nur eine untergeordnete Rolle. Der Einfluss der Reflexion durch das Werkstück verliert bei größeren Leistungen und höherer Qualität des Laserstrahles an Bedeutung. Wird ein prozentual hoher Anteil der Strahlleistung reflektiert, so kann der Prozess destabilisiert und der Tiefschweißeffect örtlich beeinträchtigt werden.

Beim Laserstrahlschweißen wird der Werkstoff teilweise verdampft, was sich als Dampf über dem Kanal bemerkbar macht. CO₂-Hochleistungslaser erzeugen so hohe Temperaturen, dass ein Teil dieses Dampfes ionisiert wird und über der Schweißstelle (Dampfkanal) eine Plasmawolke entsteht. Die Plasmawolke kann den Strahl schwächen. Zur Abhilfe wird das Plasma deshalb in der Regel mit Helium weggeblasen.

Helium wird bevorzugt zur Unterdrückung des Plasmas verwendet. Aber auch andere Gase wie Stickstoff oder Argon sind versuchsweise im Einsatz. Das Plasma kann zwar nicht vollständig unterdrückt werden, aber das Schweißen ist trotzdem möglich.

Die Verdampfungsvorgänge beeinflussen die einzelnen chemischen Elemente des Grundwerkstoffes. Elemente mit hohem Dampfdruck entweichen schneller. Das Schweißgut weist deshalb eine Verringerung dieser Elemente gegenüber dem Grundwerkstoff auf.

12.1.3 Strahlpulsschweißen

Das Strahlpulsen kann zum Punktschweißen und zum (Mikro-) Schweißen mit geringer Wärmeeinbringung eingesetzt werden. Die hohe Spitzenleistung in gepulsten Lasern ist darüber hinaus in der Lage, den Tiefschweißeffect beim Schweißen vergleichsweise dicker Werkstücke zu stabilisieren. Dabei muss die Schweißgeschwindigkeit gegenüber einem leistungsstarken, kontinuierlichen Laser verringert werden.

12.1.4 Strahloszillation

Das Oszillieren des Strahles eignet sich zum Verbreitern der Naht und zum Überbrücken von Fugenspalten. Die Vergrößerung des Schweißquerschnittes hat eine Verringerung der Abkühlrate zur Folge.

12.1.5 Rampen

Beim Rampen wird die Laserstrahlleistung zusammen mit dem Fokus am Nahtanfang und -ende numerisch gesteuert (slope-up und slope-down). Das ist von großer Bedeutung beim Schweißen von Axial- und Radialrundnähten.

12.1.6 Strahlfokussierung

Der Laserstrahl wird in der Regel auf oder in Nähe der Werkstückoberfläche fokussiert.

12.1.7 Schutzgas

Für die meisten Anwendungen ist Schutzgas erforderlich. Zu schützen sind das Schmelzbad, die erwärmten Werkstückbereiche unmittelbar hinter dem Schmelzbad und die Nahtunterseite (bei vollständiger Durchschweißung). Es sollten geeignete Gasdüsen verwendet werden, um einen regelmäßigen Gasstrom zu erhalten. Die Notwendigkeit einer Gasabschirmung und die Auswahl des Schutzgases hängen vom zu schweißenden Werkstoff ab. Ein ausreichender Schutz aller erwärmten Bereiche ist zum Beispiel beim Schweißen rostbeständiger Stähle im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit von entscheidender Bedeutung. Bei vollständigem Durchschweißen von unlegiertem Stahl kann auf einen Gasschutz der Wurzel verzichtet werden. Auch das Schweißen geringer Waddicken mit hoher Geschwindigkeit kann ohne Schutzgas erfolgen.

12.1.8 Verwendung von Zusatzwerkstoffen

Zusatzwerkstoffe können beim Schweißen von Nahtfugenspalt und zum Vermeiden eines Nahtdurchhangs erforderlich sein. Zusatzwerkstoffe können auch aus metallurgischen Gründen notwendig sein. Zu beachten ist eine genaue Positionierung des Drahtes. Der Hybrid-Lichtbogen-Prozess kann eine bessere Lösung sein.

12.1.9 Hybridprozesse

Hybridprozesse sind eine Kombination des Laserstrahlschweißens mit Lichtbogenschweißverfahren wie dem Plasma-, Wolfram-Inertgas- oder Metallaktivgasschweißen usw. Sie können besonders vorteilhaft sein, wenn außerdem Zusatzwerkstoff benötigt wird. Sie ermöglichen weiterhin hohe Schweißgeschwindigkeiten sowie geringe Wärmeeinbringung. Die Möglichkeit, Wurzel- und Fülllagen kombiniert zu schweißen, ist ein weiterer Vorteil der Hybridprozesse. Empfehlungen für das Lichtbogenschweißen können der EN 1011-1 entnommen werden.

12.2 Vorteile und Einschränkungen

Das Laserstrahlschweißen hat mit dem Tiefschweißeffect im Vergleich zu anderen Schmelzschweißverfahren zahlreiche Vorteile:

- es wird nur wenig Werkstoff aufgeschmolzen. Das bedeutet geringe Wärmeeinbringung, schmale Wärmeeinflusszonen sowie minimale Schrumpfung und minimalen Verzug;
- es sind hohe Schweißgeschwindigkeiten möglich und in den meisten Fällen kann die Verbindung in einer Lage bzw. in höchstens zwei Lagen von je einer Seite geschweißt werden;
- geschweißt werden Waddicken bis herunter zu wenigen hundertstel Millimetern. Die obere Grenze liegt zurzeit bei einer Dicke von 25 mm in Stahl, einseitig vollständig durchgeschweißt.

Im Vergleich zum Elektronenstrahlverfahren wird mit dem Laserstrahl unter normalen atmosphärischen Bedingungen geschweißt und es entstehen keine Röntgenstrahlen.

Die wesentlichen Einschränkungen sind:

- die hohen Abkühlungsraten erzeugen in einigen Werkstoffen unerwünschte Eigenschaften;
- Risse und/oder Porosität können in einigen Werkstoffen auftreten;
- Werkstücke mit hoch reflektierender Oberfläche führen beim Schweißen zu Schwierigkeiten, da der Strahl zurückgeworfen und nicht absorbiert wird;

- Laserstrahlanlagen besitzen zurzeit noch einen geringen Wirkungsgrad. Der gesamte Energiebedarf ist bis zu 30-mal höher als die Strahlenergie;
- manuelles Schweißen ist schwierig. In der Praxis müssen maschinelle Einrichtungen benutzt und alle Arbeitsschritte vorprogrammiert werden;
- Elemente mit hohem Dampfdruck werden als Folge der Verdampfung im Schweißgut reduziert;
- an die Qualität der Nahtvorbereitung und die Genauigkeit der Positionierung oder der Nahtverfolgung werden hohe Anforderungen gestellt;
- Oberflächenbeschichtungen können Unregelmäßigkeiten erzeugen und für eine einwandfreie Verarbeitung sind sauber geschweißte Verbindungen zwingend erforderlich.

12.3 Montage und Spannvorrichtungen

Für das Laserstrahlschweißen können die üblichen Spannvorrichtungen, Handhabungsmittel, X-Y-Tische usw. verwendet werden. Zum Laserstrahlschweißen werden grundsätzlich keine Spannvorrichtungen benötigt, die sich von denen bei anderen Schweißverfahren unterscheiden. Es müssen jedoch Spannvorrichtungen verwendet werden, die den Genauigkeitsanforderungen und den Toleranzen der Schweißbauteile Rechnung tragen. Hinweise dazu enthalten EN ISO 15616-1 bis EN ISO 15616-3. Die Konstruktion und Automatisierung von Spannvorrichtungen kann für ein wirtschaftliches und effizientes Schweißverfahren entscheidend sein, da die tatsächliche Schweißzeit oft nur einen Bruchteil der Gesamtaktzeit ausmacht (zu der zudem die Positionierung, die Handhabung usw. gehören).

12.4 Prozesssteuerung

Das Laserstrahlschweißen erfolgt mit numerischer Steuerung. Regelungen oder Rückkopplungen während des Schweißens sind mit Sensoren möglich, die den Strahl zum Werkstück dynamisch justieren.

12.5 Inspektion und Prüfen

EN ISO 15614-11 enthält Hinweise auf Normen für das zerstörende Prüfen. EN- oder ISO-Normen über das zerstörungsfreie Prüfen von Laserstrahl-Schweißnähten sind noch nicht vorhanden. Normen für das Prüfen von Lichtbogen-Schweißnähten können mit entsprechenden Anpassungen verwendet werden.

12.6 Unregelmäßigkeiten

Begriffe für Unregelmäßigkeiten werden in EN ISO 6520-1 erläutert. Bewertungsgruppen, die zur Prozesssteuerung verwendet werden können, sind in EN ISO 13919-1 bis EN ISO 13919-2 spezifiziert.

Anhang A (informativ)

Einrichtungen

A.1 Beschreibung des Laserstrahlprozesses

A.1.1 Grundlagen

Laser ist die Abkürzung von **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung). Der Laser ist im Wesentlichen eine Einrichtung zum Erzeugen eines verhältnismäßig kleinen und leistungsstarken Lichtstrahls, der sich zum Schweißen, Schneiden, Randschichtbehandeln und Bohren eignet. Einen Laser kann man in gewisser Hinsicht als schwarzen Kasten (black box) betrachten. Die Strahlerzeugung und die wirklichen Eigenschaften eines einzelnen Lasers sind nur für laufende Wartungen, Kalibrierungen und Instandsetzungen von Interesse, soweit sie vom Nutzer ausgeführt werden können. Dazu sollten die Unterlagen des Herstellers (Instandsetzungshandbuch) für die jeweilige Anlage herangezogen werden. Diese Betrachtung ist jedoch nicht realistisch, da eine große Zahl von verschiedenen Lasertypen mit unterschiedlichen Eigenschaften und begrenzten Einsatzmöglichkeiten existieren. Eine kurze Beschreibung der verschiedenen Typen ist schon allein deshalb erforderlich, um die Begriffe in den Abschnitten dieser Norm zu erläutern. Darüber hinaus sind eine Reihe von Fachbüchern, Aufsätzen und andere Informationen über die Laserstrahltechnik vorhanden, auf die der Nutzer für weitere Einzelinformationen zurückgreifen kann.

Alle Lasereinrichtungen bestehen aus einem Resonator, der das Licht erzeugt und verstärkt. Der Resonator besteht aus reflektierenden und teildurchlässigen Spiegeln und anderen Formen von Barrieren.

Im Inneren des Resonators erzeugt ein Medium kontinuierliches oder pulsierendes Licht. Ein Anteil des gespeicherten Lichts verlässt als Laserstrahl den Resonator.

Die Energie wird von außen in das Medium des Resonators eingeleitet (Pumpenergie). Sie wird nicht zu 100 % zu einem Laserstrahl umgewandelt; die Überschussenergie muss durch ein Kühlsystem abgeführt werden.

A.1.2 Baugruppen

Die Laserstrahlquelle ist nur ein Teil der gesamten Anlage. Zu den Laseranlagen zählen auch mechanische, automatische oder Roboter-Einrichtungen. Einzige Ausnahmen sind manuell geführte Lasergeräte geringer Leistung für besondere (nicht industrielle) Anwendungen.

Eine typische Laseranlage (workstation) besteht in der Regel aus folgenden Baugruppen:

- der Laserstrahlquelle;
- den Einrichtungen zum Führen, Formen und Fokussieren des Laserstrahls auf das Werkstück;
- den Einrichtungen zum Bewegen des Laserstrahls oder des Werkstücks;
- den Spannvorrichtungen zum Fixieren des Werkstücks;
- den Kühlsystemen;
- den Steuerungssystemen.

A.2 Laserstrahlquellen

A.2.1 CO₂-Laser

Tabelle A.1 — CO₂-Laser

Kriterien	Merkmale
Stand der Technik	Kohlenstoffdioxid-(CO ₂ -)Laser sind technisch ausgereift und seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz.
Laseraktives Medium im Resonator	CO ₂ -, N ₂ - und He-Gase sowie andere Gase im Behälter. CO ₂ ist das aktive Gas.
Energiequelle	Elektrische Entladungen im Resonator.
Wellenlänge	CO ₂ -Laser emittieren Laserstrahlen mit einer Wellenlänge von 10,6 µm aus dem Infrarotbereich, das von den meisten Werkstoffen absorbiert wird. Damit ist der Prozess für eine Vielzahl von Werkstoffen geeignet.
Strahlleistung	Gegenwärtig ist die Grenze der maximalen Strahlleistung auf etwa 50 kW bei kontinuierlichem Strahlaustritt begrenzt. Pulsieren ist bis zu Frequenzen von 100 kHz möglich. In größeren Laserstrahlquellen entspricht die Spitzenleistung etwa der maximalen Leistung bei Dauerbetrieb.
Optiken	Laserstrahlen mit der obengenannten Wellenlänge werden auch von Glas usw. absorbiert. Deshalb sollten besondere Materialien für optisch durchlässige Bauteile wie Austrittsfenster oder Linsen verwendet werden. Kupferspiegel können als reflektierende optische Elemente verwendet werden. Faseroptiken können nicht verwendet werden.
Schweißzusätze	Die Gase im Resonator degenerieren mit der Zeit und müssen laufend erneuert werden. Der betriebliche Gasverbrauch hängt in erster Linie vom Anlagenaufbau ab.
Wirkungsgrad	Der Anlagen-Gesamtwirkungsgrad beträgt etwa 5 % bis 15 %.

A.2.2 Lampengepumpte Nd:YAG-Laser

Tabelle A.2 — Lampengepumpte Nd:YAG-Laser

Kriterien	Merkmale
Stand der Technik	Nd:YAG-Laser sind technisch ausgereift und seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz.
Laseraktives Medium im Resonator	Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall. Nd ist das aktive Material.
Energiequelle	Blitzlampen für Pulsbetrieb, Lichtbogenlampen für Dauerbetrieb.
Wellenlänge	Nd:YAG-Laser emittieren Laserstrahlen mit einer Wellenlänge von 1,06 µm aus dem nahinfraroten Spektralbereich. Einige Werkstoffe wie z. B. Glas sind für diese Wellenlänge durchlässig und für eine Bearbeitung nicht geeignet. Die meisten Metalle dagegen absorbieren diese Wellenlänge.
Strahlleistung	Der Laserstrahl kann entweder im Puls- oder Dauerbetrieb arbeiten. Gegenwärtig liegt die maximale Spitzenleistung bei Pulsbetrieb im Megawattbereich. Die Durchschnittsleistung ist dagegen wesentlich geringer.

Kriterien	Merkmale
	und erreicht in der Regel 10 kW für beide Betriebsarten.
Optiken	Es können Glaslinsen und Faseroptiken verwendet werden.
Schweißzusätze	Die als Energiequelle eingesetzten Lampen haben eine begrenzte Lebensdauer.
Wirkungsgrad	Der Anlagen-Gesamtwirkungsgrad beträgt < 5 %.

A.2.3 Diodengepumpte Nd:YAG-Laser

Tabelle A.3 — Diodengepumpte Nd:YAG-Laser

Kriterien	Merkmale
Stand der Technik	Nd:YAG-Laser mit Array-Dioden als Energiequelle. Diodenlaser stammen aus der Kommunikationstechnik, in der sie seit vielen Jahren im Einsatz sind.
Laseraktives Medium im Resonator	Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall.
Energiequelle	In Arrays angeordnete Diodenlaser, die durch elektrische Energie angeregt werden.
Wellenlänge	Nd:YAG-Laser emittieren Laserstrahlen mit einer Wellenlänge von 1,06 µm aus dem nahinfraroten Spektralbereich. Einige Werkstoffe wie z. B. Glas sind für diese Wellenlänge durchlässig und für eine Bearbeitung nicht geeignet. Die meisten Metalle dagegen absorbieren diese Wellenlänge.
Strahlleistung	Der Laserstrahl kann entweder im Puls- oder Dauerbetrieb arbeiten. Gegenwärtig liegt die maximale Spitzenleistung bei Pulsbetrieb im Megawattbereich. Die Durchschnittsleistung ist dagegen wesentlich geringer und erreicht in der Regel 20 kW für beide Betriebsarten.
Optiken	Es können Glaslinsen und Faseroptiken verwendet werden.
Schweißzusätze	Die Lampen der Energiequelle haben in der Regel eine Lebensdauer von 10 000 h.
Wirkungsgrad	Der Anlagen-Gesamtwirkungsgrad beträgt 25 % oder mehr.

A.2.4 Hochleistungs-Array-Diodenlaser

Tabelle A.4 — Hochleistungs-Array-Diodenlaser

Kriterien	Merkmale
Stand der Technik	Hochleistungs-Array-Diodenlaser zu Stacks angeordnet erzeugen mehrere Laserstrahlen. Diese Laser sind eine spezielle Weiterentwicklung und seit vielen Jahren in der Kommunikationstechnik im Einsatz. Sie stellen eine neue, erfolversprechende Technologie dar.
Laseraktives Medium im Resonator	Halbleitende Werkstoffe in den Dioden.
Energiequelle	Elektrische Energie

Kriterien	Merkmale
Wellenlänge	Hochleistungs-Array-Diodenlaser, wie sie gegenwärtig entwickelt werden, emittieren Laserstrahlen mit einer Wellenlänge von 0,8 µm bis 1 µm aus dem nahinfraroten Teil des Spektrums. In Zukunft sollten jedoch auch andere Wellenlängen möglich sein. Einige Werkstoffe wie z. B. Glas sind für diese Wellenlänge durchlässig und für eine Bearbeitung nicht geeignet. Die meisten Metalle dagegen absorbieren diese Wellenlänge.
Strahlleistung	Der Laserstrahl kann entweder im Puls- oder Dauerbetrieb arbeiten. Gegenwärtig ist die Durchschnittsleistung auf 6 kW beschränkt.
Optiken	Es können Glaslinsen und Faseroptiken verwendet werden.
Schweißzusätze	Keine
Wirkungsgrad	Der Anlagen-Gesamtwirkungsgrad beträgt bis zu 50 %.

A.2.5 Faserlaser

Tabelle A.5 — Faserlaser

Kriterien	Merkmale
Stand der Technik	Der Faserlaser stellt eine Variante des standardmäßigen Festkörperlaser dar, bei der das Medium nicht aus einem Stab, einer Platte oder einer Scheibe, sondern aus einer gemantelten Faser besteht. Die Laserlichtstrahlen werden von einem Dotierstoff im Kern der Faser emittiert; die Kernstruktur kann simpel bis komplex sein. Für Faserlaser spricht vor allem die Tatsache, dass Fasern ein großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweisen, sodass Wärme relativ einfach abgeleitet werden kann. Faserlaser werden meist mit Laserdioden, manchmal aber auch mit anderen Faserlasern, optisch gepumpt.
Laseraktives Medium im Resonator	LMA- (Large Mode Area) Doppelkern-Fasern
Energiequelle	Diodenlaser-Pumpmodule
Wellenlänge	1 µm
Strahlleistung	Der Laserstrahl kann entweder im Puls- oder Dauerbetrieb arbeiten. Die Durchschnittsleistung liegt in der Regel bei bis zu 8 kW.
Optiken	Es gibt keine Endoptiken, solange der Ausgangsstrahl auf Fasern trifft.
Schweißzusätze	Keine
Wirkungsgrad	Der Anlagen-Gesamtwirkungsgrad beträgt bis zu 50 %.

A.2.6 Andere Lasertypen

Einige weitere Lasertypen finden geringe industrielle Anwendung. Nd:Glas- und Rubin-Laser ähneln den lampengepumpten Nd:YAG-Lasern, jedoch mit Nd:Glas bzw. Rubin als Medium im Resonator.

Excimer-Laser sind mit CO₂-Lasern zu vergleichen, mit dem Unterschied, dass der Resonator ein Gemisch aus inerten Gasen (Argon, Krypton, Xenon) und Halogenen (z. B. Fluor) enthält. Excimer-Laser sind auf Pulsbetrieb begrenzt und weisen eine Wellenlänge von 0,2 µm bis 0,4 µm auf.

A.3 Strahlführung, -formung und -fokussierung

A.3.1 Strahlführung

Laserstrahlen werden aus Sicherheits- und anderen Gründen in der Regel in Rohre oder Faserkabel geführt. Lediglich im kurzen Abstand zwischen der Fokusoptyk und dem Werkstück ist der Laserstrahl ungeschützt. Eine CO₂-Laserquelle besitzt meistens ein Strahlführungssystem, das aus einer Vielzahl von geraden Rohren besteht. In den Rohren wird der Strahl mithilfe von Spiegeln und/oder Linsen geführt. Fliegende Optiken (siehe unten) benötigen mindestens ein teleskopartiges Rohr.

Faseroptiken ermöglichen eine große Flexibilität, sind aber nicht für CO₂-Laser geeignet.

A.3.2 Strahlformung (Fokusoptyk)

A.3.2.1 Allgemeines

Die Form des Rohstrahls wird auf dessen Weg in der Regel durch verschiedene Spiegel und/oder Linsen beeinflusst. Zuletzt muss der Strahl für die entsprechenden Arbeitsaufgaben jedoch besonders geformt werden. Dies wird durch eine Fokusoptyk am Ende der Strahlführung erreicht. Danach bewegt sich der Strahl ohne weitere Formung von der Fokusoptyk bis zum Werkstück.

Die Fokusoptyk wird oft durch weitere Einrichtungen ergänzt. In dieser Europäischen Norm wird mit Bearbeitungskopf die Gesamteinheit bezeichnet.

A.3.2.2 Fokussierungsvorrichtung

Normalerweise wird der Laserstrahl zu einem kleinen Querschnitt (Fokus) auf dem Werkstück fokussiert. Dies erfolgt durch optische Einrichtungen wie Linsen oder parabolisch geformte Spiegel. Linsen für CO₂-Laserstrahlen sind aus einem Werkstoff, der für diese Wellenlänge transparent ist. Häufig wird hierfür der Werkstoff Zinkselenit eingesetzt. Fokussierende Kupferspiegel sind ebenfalls anwendbar. Bei Hochleistungslasern ist eine verstärkte Kühlung erforderlich. Dies gilt insbesondere für (Metall-)Spiegel. Linsen können in gekühlte Haltevorrichtungen montiert werden, eine direkte Kühlung ist nicht üblich.

Nach den optischen Gesetzen kann der kleinste Querschnitt nur an einem Punkt der Strahlachse erreicht werden. Neben diesem Punkt ist der Querschnitt deutlich größer. Das erfordert eine sehr genaue Positionierung des Bearbeitungskopfes zum Werkstück. Wird der Strahl zu einem breiteren Querschnitt fokussiert, ist eine größere Toleranz der Fokusposition möglich.

Die maßgebenden Gleichungen sind (leicht vereinfacht):

$$r_f \approx \frac{f}{R \times K} \quad (\text{A.1})$$

$$z_u \approx \frac{f^2}{K \times R^2} \quad (\text{A.2})$$

Dabei ist

f Fokusabstand vom optischen Element (optischer Abstand zum kleinsten Strahlquerschnitt);

r_f Strahlradius im Fokusfleck;

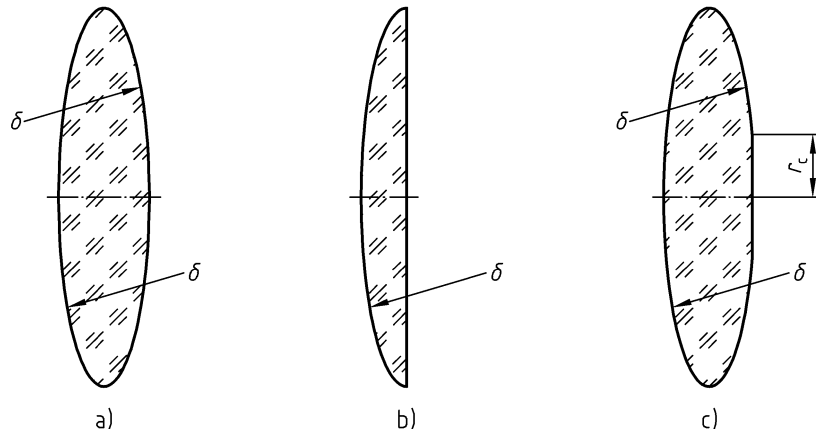
z_u Abstand auf der Strahlachse bis zum Strahldurchmesser größer als $2 r_f$;

R Strahlradius vor Eintritt in das optisch formende Element;

K Strahlpropagationsfaktor.

Berechnung von K , siehe Anhang B.

Die Anforderungen für das Fokussieren hängen von den Anwendungen ab. Zum Laserstrahlschweißen ist ein Strahldurchmesser unerlässlich, der beide Nahtflanken, insbesondere bei einem Spalt, aufschmilzt. Andererseits kann auch eine möglichst geringe Nahtbreite aus metallurgischen Gründen notwendig sein. Das erfordert verschiedenartige Fokussysteme. Eine Lösung besteht darin, bei Nahtflankenspalten den Laserstrahl aufzuteilen und getrennt auf die beiden Werkstücke zu fokussieren. Dies kann eine Lösung sein, z. B. beim Schweißen von Verbindungen mit Spalten. Optimales Laserstrahlschneiden ist dagegen nur mit einer besonderen Leistungsdichteverteilung entlang der Strahlachse zu erreichen. Als Lösungen bieten sich Bifokallinsen oder -spiegel an. Die Grundlagen einer Bifokallinse sind in Bild A.1 dargestellt.



Legende

- a) Der Fokusabstand einer doppelt konvexen, symmetrischen Linse ist proportional zum Radius δ der Kugeloberfläche ($f_1 \sim \delta$)
- b) Der Fokusabstand einer konvex/flachen Linse ist $f_2 \sim 2\delta$
- c) Planschleifen des inneren Bereiches einer doppelt konvexen Linse ergibt eine Bifokallinse mit den Fokusabständen f_1 und $f_2 = 2f_1$ für den Strahldurchtritt im inneren bzw. äußeren Linsenbereich. Andere Verhältnisse sind möglich, wenn der innere Linsenbereich einen Kugelradius $\neq \delta$ aufweist

Bild A.1 — Grundlagen einer Bifokallinse

Bifokallinsen konzentrieren die Strahlleistung sowohl auf die Werkstückoberfläche als auch in die Schnitttiefe. Der optimale Abstand zwischen den beiden Fokuspunkten hängt von der Werkstückdicke (Schnitttiefe) und vom Werkstoff ab. Jede Linse eignet sich für einen bestimmten Dickenbereich.

A.3.2.3 Einrichtungen zum Depolarisieren

Lichtpolarisationen werden bei Reflexionen an Oberflächen hervorgerufen. Diese Erscheinung lässt sich leicht durch Betrachten einer glänzenden Fläche mit einem Polarisationsfilter feststellen, z. B. mit einer Polarisationssonnenbrille. Einige Laserquellen, insbesondere CO₂-Laser, können einen Strahl mit ausgeprägter Polarisation erzeugen, was durch Reflexion an der Werkstückoberfläche zu unerwarteten Fehlern führen kann.

Eine Depolarisation (Kreispolarisation) kann durch besondere optische Einrichtungen erreicht werden.

A.3.2.4 Pilotlaserstrahl

Praktisch alle Laserstrahlen für die Materialbearbeitung weisen Wellenlängen auf, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Positionieren wäre deshalb nur durch „Versuch und Fehler“ (trial and error) möglich. Die meisten industriellen Laseranlagen verfügen deshalb über einen HeNe-Pilotlaser, der einen sichtbaren

Strahl mit geringer Leistung emittiert. Die Pilotlaserquelle wird in unmittelbarer Nähe der Leistungslaserquelle angeordnet. Eine Vorrichtung mit beweglichen Spiegeln lenkt sowohl den Leistungs- als auch den Pilotstrahl in die Strahlachse und durch die Strahlführungs- und Fokussiereinrichtungen.

A.3.2.5 Schutz der Optiken

Bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlen wird die Werkstückoberfläche bis zum Schmelzen erwärmt. Dabei entstehen Dämpfe, Gase und Schmelzpartikel (Spritzer). Spritzer können bei sehr hohen Geschwindigkeiten ausgestoßen werden.

Treffen Spritzer oder Dämpfe auf optische Elemente, so werden ihre Eigenschaften beeinträchtigt. Eine Kettenreaktion kann die Folge sein, da beschädigte optische Elemente mehr Strahlungsenergie absorbieren und somit weiter in Mitleidenschaft gezogen werden.

Allgemeine Vorsichtsmaßnahmen sind:

- Nutzung großer Fokusabstände. Hierdurch wird der Abstand zwischen Werkstück und Bearbeitungskopf erweitert;
- Verwenden eines „Cross-Jets“ (Luftmessers) zwischen den optischen Elementen und der Austrittsdüse für das Schutz- oder Schneidgas. Der „Cross-Jet“ (Luftmesser) ist ein schmaler Schlitz, der eine große Luft- oder Gasmenge mit hoher Geschwindigkeit quer zum Strahlweg ausströmt. Spritzer und Dämpfe werden dadurch von den optischen Elementen ferngehalten;
- Verwenden von Schutzfenstern aus lasertransparentem Glas, Kunststoff oder anderen Werkstoffen. Die Schutzfenster werden wie der „Cross-Jet“ (Luftmesser) in den Strahlweg positioniert.

A.3.2.6 Schutzgase

Bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlen wird die Werkstückoberfläche in der Regel auf hohe Temperaturen, oft bis zum Schmelzen, erwärmt. Die meisten Werkstoffe oxidieren oder verbrennen unter diesen Bedingungen. Schutzgase, häufig Argon oder andere inerte Gase, werden als Gegenmaßnahme eingesetzt. Materialbearbeitung unter Vakuum (ähnlich wie beim Elektronenstrahlverfahren) ist theoretisch möglich, aber nur in sehr wenigen Fällen praktikabel.

Das Inertgas strömt aus einer Düse, die an der Fokuseinrichtung befestigt ist und den Laserstrahl umgibt. Es kann hierfür jedoch auch ein separates Rohr verwendet werden. Dadurch werden die erwärmten Oberflächen gegen Oxidation geschützt. Beim Schweißen und ähnlichen Anwendungen ist es oft erforderlich, den Gasmantel ebenfalls auf Bereiche hinter der Düse auszudehnen, um auch die geschweißte Naht während der Abkühlungsphase zu schützen. Bei hohen Schweißgeschwindigkeiten reicht der Schutzgasmantel aus der Düse möglicherweise nicht für den Abkühlvorgang.

Außerdem ist beim Schweißen mit vollständiger Durchdringung und ähnlichen Anwendungen die Nahtwurzel zu schützen. Eine Oxidation kann Werkstoffeigenschaften ungünstig beeinflussen, Oberflächenspannungen reduzieren und damit das Durchschweißen erschweren. Die Wurzel lässt sich aber nur selten durch eine an der Fokuseinrichtung befestigte Vorrichtung schützen.

A.3.2.7 Schneidgase

Zum Laserstrahlschneiden ist ein Schneidgas erforderlich. In der Regel benutzt man dazu eine schmale, den Laserstrahl unmittelbar umgebende zentrische Düse, die das Schneidgas mit hoher Geschwindigkeit austreten lässt. Die Düse für das Schneidgas ist ringförmig außerhalb der Gasdüse angeordnet.

A.3.2.8 Gase zum Unterdrücken des Plasmas

Beim Laserstrahlschweißen wird ein tiefes, schmales Schmelzbad mit einem zentrischen Kanal (Tiefschweißeffekt) erzeugt. Dabei verdampft ein Anteil des Werkstoffes und ein anderer Anteil wird ionisiert. In der Folge entsteht Plasma, das den Schweißprozess durch Absorption von Strahlungsenergie in hohem Maß beeinflusst. Eine Düse in der Nähe des Schmelzbades kann das Plasma durch einen Gasstrom unterdrücken. Normalerweise wird beim Laserstrahlschweißen dazu Heliumgas verwendet.

A.3.2.9 Zusatzwerkstoffe

Zusatzwerkstoffe werden gelegentlich beim Laserstrahlschweißen und in jedem Fall beim Laserstrahlplattieren eingesetzt. Zusatzwerkstoffe werden in Form von Draht oder Pulver bzw. in Kombination verwendet. Meist führt eine besondere Vorrichtung am Bearbeitungskopf den Zusatzwerkstoff in das Schmelzbad oder auf die Oberfläche. Schweißen bzw. Plattieren von Krümmungen erfordert besondere Einrichtungen.

A.3.2.10 Sensoren

A.3.2.10.1 Sensoren zum Positionieren

In der Massen- oder Serienproduktion werden die Bauteile mit zuverlässigen Vorrichtungen gespannt. Das Positionierungssystem muss hierzu ausreichend genau sein und Abweichungen von einem Werkstück zum nächsten verhindern.

Abweichungen treten auf bei der Nahtvorbereitung und bei Bewegungen des Werkstückes während der Bearbeitung (z. B. Laserstrahlschneiden von großen Blechen, die nur an den Ecken oder nicht umfassend gespannt sind). Um diese Abweichungen zu erfassen, werden verschiedenartige Sensoren zum Positionieren des Bearbeitungskopfes zur Naht verwendet.

Von besonderer Bedeutung ist dabei der Abstand zwischen Bearbeitungskopf und Werkstück. Er kann durch kapazitive oder durch einfache mechanische Sensoren gemessen werden. Mit derartigen Sensoren sind Laserstrahl-Schneidanlagen ausgerüstet, um auch bei Verwerfungen des Bleches während der Bearbeitung den vorgegebenen Abstand genau einzuhalten.

Beim Schweißen kann ein Sensor erforderlich sein, der den Laserstrahl der Nahtfuge folgen lässt und das Schmelzen der beiden Nahtflanken sichert. Diese Sensoren sind auch beim Lichtbogenschweißen üblich. Einzelheiten darüber können anderen Unterlagen entnommen werden.

A.3.2.10.2 Sensoren für die Prozesssteuerung

Theoretisch können Sensoren für die Prozesssteuerung eingesetzt werden. Sie detektieren Kenngrößen, die im engen Zusammenhang mit dem Bearbeitungsvorgang stehen, wie die UV- oder IR-Strahlung als Teil des elektromagnetischen Spektrums. Beim Laserstrahlschweißen mit vollständiger Durchdringung würde z. B. eine Wechselbeziehung zwischen der Breite des Wurzelspaltes und der Intensität der IR-Strahlung festgestellt.

Der Einsatz von Sensoren zur Prozesssteuerung befindet sich allerdings noch im Versuchsstadium. Eine andere Möglichkeit ist die zerstörungsfreie Prüfung wie z. B. die Ultraschallprüfung unmittelbar hinter dem Bearbeitungskopf. Dies könnte im Prinzip eine Prozesssteuerung ermöglichen, oder zumindest eine sofortige Unterbrechung bei Störungen nach dem Schweißen nur weniger Zentimeter einer fehlerhaften Naht.

A.3.2.10.3 Hybrid-Bearbeitungsköpfe

Für einige Anwendungen wird eine Kombination aus Laserstrahl- und Lichtbogenschweißverfahren eingesetzt. Dazu wird eine Schweißdüse an den Laserstrahl-Bearbeitungskopf montiert. Hybridprozesse sind

bisher nur vereinzelt aber mit steigender Tendenz im Einsatz. Einzelheiten über das Lichtbogenschweißen und Schweißdüsen können anderen Unterlagen entnommen werden.

A.4 Einrichtungen zum Bewegen des Laserstrahls und des Werkstückes

Die meisten Anlagen sind mit Einrichtungen für die Relativbewegungen zwischen Laserstrahl und Werkstück während des Bearbeitungsvorganges ausgerüstet. Der Strahl hat z. B. der Schweißnaht zu folgen. Typische Möglichkeiten sind in der Tabelle A.5 aufgeführt.

Tabelle A.6 — Typische Lösungen für Bewegungseinrichtungen

Typische Lösungen	Vorteile	Nachteile
Stationärer Laser bzw. Laserbearbeitungskopf, Werkstück wird bewegt.	Für alle Laser anwendbar. Bearbeiten (z. B. Schweißen) in der gleichen Position möglich. Der Laserstrahlengang ist fixiert und ein Justieren während der Bearbeitung ist nicht notwendig. Keine Veränderung der Laserstrahlgeometrie während der Bearbeitung. Mit Hilfe eines Strahlteilers ist es möglich, den Laserstrahl auf mehrere Arbeitsstationen umzuschalten.	Schwierig bei großen oder schweren Werkstücken. Große Spannvorrichtungen sind erforderlich. Kann zu Schwierigkeiten in Fertigungsstraßen führen.
Bewegliche Laserstrahlquelle, Werkstück stationär.	Für alle Laser anwendbar. Der Laserstrahlengang ist fixiert und ein Justieren während der Bearbeitung ist nicht notwendig.	Schwierig bei großen oder schweren Laserstrahlquellen. Arbeitsposition ändert sich bei gekrümmten Bahnen. Beim Schalten zu mehreren Arbeitsstationen muss der Laser bewegt werden.
Stationäre Laserstrahlquelle, Strahlführung durch Faseroptiken z. B. mit Manipulatoren.	Flexible und einfache Lösung. Der Laserstrahlengang ist fixiert und ein Justieren während der Bearbeitung ist nicht notwendig. Möglichkeit des Schaltens zwischen mehreren Arbeitsstationen.	Nicht geeignet z. B. für CO ₂ -Laser.
Stationäre Laserstrahlquelle, Strahlführung durch bewegliche Optiken (fliegende Optiken), Werkstück stationär.	Für alle Laser anwendbar. Geeignet für große oder schwere Laserstrahlquellen. Geeignet für große oder schwere Werkstücke. Mithilfe eines Strahlteilers ist es möglich, den Laserstrahl auf mehrere Arbeitsstationen umzuschalten.	Die Optiken und/oder die Strahlgeometrie müssen während der Bearbeitung häufig justiert werden. Die Strahlgeometrie ändert sich als Folge der Divergenz.

Einige Anlagen bestehen aus zwei (oder mehreren) Bewegungseinrichtungen wie z. B. X-Y-Tisch, bewegtes Werkstück und fliegende Optik für Bewegungen in der Z-Achse.

A.5 Vorrichtungen zum Spannen der Werkstücke

Spannvorrichtungen für die Materialbearbeitung mit Laserstrahlen sind nicht spezifiziert und werden in der vorliegenden Norm nicht beschrieben. Zu beachten ist jedoch 6.2 zu Abnahmeprüfungen.

A.6 Kühlsysteme

Die meisten Laserstrahlssysteme haben einen sehr geringen thermischen Wirkungsgrad. Dies erfordert eine beträchtliche Wärmeabfuhr bei Hochleistungslasern. Das Kühlsystem z. B. für einen 10 kW CO₂-Laser hat eine Wärmeleistung von rund 200 kW abzuführen. Als Kühlmittel wird in der Regel demineralisiertes Wasser verwendet.

Die meisten Laserstrahlquellen und andere Komponenten benötigen eine Kühlung bis zur normalen Raumtemperatur. Die Möglichkeit, Fluss- oder Seewasser zu verwenden, kann für die Kühlung von Hochleistungslasern geeignet sein, ist aber eine Ausnahme. Normalerweise wird ein Kühlsystem (Wärmepumpe) mit ausreichender Wassermenge installiert. Hierzu wird weitere Energie benötigt. Die Temperatur des Kühlwassers muss jedoch so hoch sein, dass keine Kondensation an Spiegeln und anderen Teilen auftritt. In Werkstätten mit hoher Raumtemperatur und hoher Feuchtigkeit (hoher Taupunkt) stellt dies ein Problem dar.

Wird die Installation einer neuen Laseranlage in Betracht gezogen, so sollte das Kühlsystem in allen Einzelheiten bewertet werden.

ANMERKUNG Die Wärmerückgewinnung für andere Anwendungen ist prinzipiell möglich.

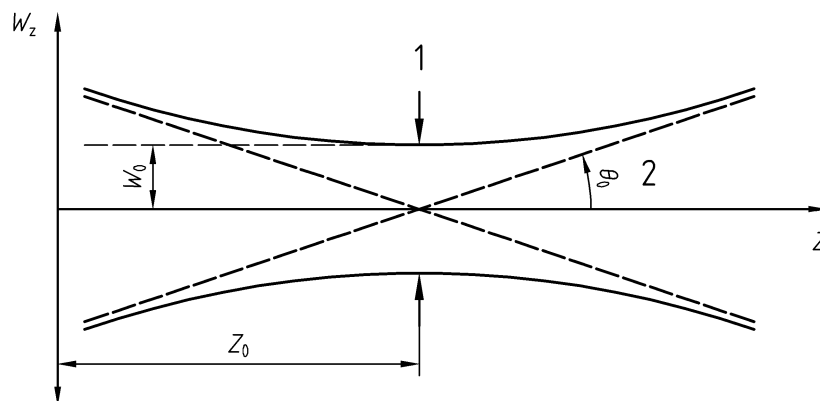
A.7 Steuerungssysteme

In der Regel wird jede Laseranlage mit einem eigenen Steuerungssystem geliefert. Soll eine neue Laseranlage installiert werden, sollte jedoch auch die Kompatibilität mit anderen Systemen berücksichtigt werden. Es geht dabei z. B. um die Möglichkeit, Programme für die Roboter und Handhabungsmittel herunterzuladen. Diese Überlegungen gelten für alle mechanischen, automatischen und Roboter-Einrichtungen und sind nicht auf Laseranlagen beschränkt.

Anhang B (informativ)

Laserstrahleigenschaften

Laserstrahlen können durch eine Anzahl von Parametern beschrieben werden. In den meisten Fällen wird ein mathematisches Modell zugrunde gelegt, bei dem ein axial symmetrischer Strahl den Radius w_z aufweist, der eine Funktion der Position auf der optischen Achse z ist. Das Modell ist gekennzeichnet durch drei Parameter, siehe Bild B.1.



Legende

- w_0 Strahltaillendurchmesser am Punkt 1
- z_0 Position der Strahltaille
- θ_0 Divergenzwinkel am Punkt 2 des Fernfeldes

Bild B.1 — Definition der Parameter für die Strahlöffnung und Strahlkennzeichnung

Für Laserstrahlen, die durch einen kleinen Divergenzwinkel θ_0 charakterisiert werden können, gilt die folgende Gleichung:

$$[w_z]^2 = w_0^2 + (z - z_0)^2 \times \theta_0^2 \quad (\text{B.1})$$

Der Laserstrahl ist ferner gekennzeichnet durch einen der beiden Faktoren K oder M^2 , wie z. B. in folgender Gleichung beschrieben:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \times \frac{1}{w_0} \times \frac{1}{\theta_0} \quad (\text{B.2})$$

Dabei ist

K Strahlpropagationsfaktor;

M^2 Indikator für das Verhältnis des wirklichen zum theoretischen Durchmesser eines begrenzt gebeugten Strahls.

Die theoretische Grenze für einen gering gebeugten Laserstrahl ist in der folgenden Gleichung beschrieben:

$$K = M^2 = 1 \quad (\text{B.3})$$

Benutzt wird häufig auch das Strahlparameterprodukt:

$$W_0 \times \theta_0 = \frac{\lambda}{K \times \pi} = \frac{M^2 \times \lambda}{\pi} \quad (\text{B.4})$$

Der theoretische, begrenzt gebeugte Strahl hat eine Energieverteilung, die einer Glockenkurve folgt (Gauß-Verteilung).

Weitere Definitionen und Gleichungen sind in Normen wie z. B. in EN ISO 11145 enthalten.

K und M^2 gleich eins entsprechen dem theoretischen Optimum für die fokussierte Laserstrahlenergie im kleinstmöglichen Bereich.

In der Praxis weichen Laserstrahlen von diesem theoretischen Modell ab. Abweichungen von der Gauß-Verteilung sind häufig, insbesondere bei Hochleistungslasern, und einige Laser erzeugen keinen kreisförmig symmetrischen Strahl. Die Energieverteilung z. B. in Dioden-Array-Hochleistungslasern ist stark unregelmäßig.

In praktischen Anwendungen ist ein Strahl mit möglichst kleinem Durchmesser nicht in jedem Fall erforderlich. Beispielsweise ist beim Schweißen von großen Wanddicken ein Strahl von bestimmter Breite erforderlich, um das Aufschmelzen beider Nahtflanken zu gewährleisten (es können Spalte vorhanden sein) und in anderen Fällen zum Beispiel Schrumpfrisse und Poren zu vermeiden. Für weitere Überlegungen wird auf den Hauptteil dieser Europäischen Norm und die Abschnitte für verschiedene Anwendungen verwiesen.