

Technische Information

Laserbearbeitung

CO₂-Laser

Laserbearbeitung

CO₂-Laser

Ausgabe: **02/2007**

Bestellinformationen

Bitte geben Sie den Titel des Dokuments, die gewünschte Sprache und das Datum der Ausgabe an.

TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG
Technische Dokumentation
Johann-Maus-Straße 2
D-71254 Ditzingen
Fon: +49 (0) 71 56/3 03-0
Fax: +49 (0) 71 56/3 03-5 40
Internet: <http://www.trumpf.com>
E-Mail: docu.tw@de.trumpf.com

Das Dokument wurde in der **Technischen Dokumentation** der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG verfasst.

Alle Rechte an dieser Dokumentation, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung liegen bei TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Kein Teil der Dokumentation darf in irgendeiner Form ohne vorherige schriftliche Zustimmung der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Irrtum und technische Änderungen vorbehalten.

© TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG

TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG haftet nicht für etwaige Fehler in dieser Dokumentation. Eine Haftung für mittelbare und unmittelbare Schäden, die im Zusammenhang mit der Lieferung oder dem Gebrauch dieser Dokumentation entstehen, ist ausgeschlossen, soweit dies gesetzlich zulässig ist.

Bevor Sie weiterlesen...

Diese Technische Information möchte Sie über das Wesentliche zum Thema CO₂-Laser informieren.

Wie ein CO₂-Laser funktioniert und wie der Laserstrahl zum Werkzeug wird, ist zu Beginn dieses Dokuments beschrieben. Welche Rolle der Laser in der Materialbearbeitung spielt und welche Qualitätskriterien bei Laserschnitten gelten, beschreiben die weiteren Kapitel.

Am Ende der Technischen Information finden Sie ein Stichwortverzeichnis sowie ein Glossar zum Schnellen auffinden bestimmter Informationen.

**Reihe: Technische
Information
"Laserbearbeitung"**

Die Technischen Informationen zur "Laserbearbeitung" gehören zu einer Reihe von Informationsschriften, die sich mit dem Thema Laser und Laserbearbeitung auseinandersetzen.

Datensammlung

Ein besonderer Hinweis gilt den Datensammlungen, die zu den einzelnen Laserschneidmaschinen von der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG zusammengestellt und herausgegeben werden. Hier finden Sie Richtwerte für das Laserschneiden und das Einstechen für unterschiedliche Werkstoffe.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Grundbegriffe der Lasertechnik

| | | |
|-----|--|-------------|
| 1. | Laserprinzip | 1-2 |
| 1.1 | Anregungsmechanismen beim CO ₂ -Laser | 1-3 |
| 2. | Eigenschaften des Laserlichts | 1-5 |
| 3. | Strahlqualität | 1-6 |
| 3.1 | Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt | 1-7 |
| 4. | Lasertypen | 1-9 |
| 5. | Aufbau einer Strahlquelle | 1-10 |
| 6. | Bestandteile einer Laseranlage | 1-11 |
| 7. | Lasersicherheit..... | 1-13 |

Kapitel 2 TRUMPF CO₂-Laser

| | | |
|-----|---|-------------|
| 1. | Ein Werkzeug für die Industrie | 2-2 |
| 2. | Kompakter Aufbau des CO₂-Lasers | 2-3 |
| 3. | Zwei Konzepte für CO₂-Laser..... | 2-4 |
| 3.1 | Geströimte CO ₂ -Laser | 2-4 |
| 3.2 | Diffusionsgekühlte CO ₂ -Laser | 2-6 |
| 4. | Anregung | 2-9 |
| 5. | Betriebsarten | 2-10 |

Kapitel 3 Den Strahl formen und führen

| | | |
|-----|----------------------------------|------|
| 1. | Komponenten | 3-2 |
| 2. | Spiegel..... | 3-3 |
| 3. | Strahlteleskop | 3-5 |
| 3.1 | Adaptive Spiegel | 3-7 |
| 3.2 | Verfahrbarer Spiegelträger | 3-8 |
| 3.3 | Fokuslagenverschiebung | 3-8 |
| 4. | Mehrstationenbetrieb..... | 3-9 |
| 4.1 | Strahlteiler | 3-9 |
| 4.2 | Strahlweichen..... | 3-10 |

Kapitel 4 Komponenten zur Fokussierung

| | | |
|-----|--|------|
| 1. | Grundlagen | 4-2 |
| 2. | Bearbeitungsoptiken | 4-6 |
| 2.1 | Linsenoptiken | 4-7 |
| 2.2 | Spiegeloptiken..... | 4-8 |
| 2.3 | Scanneroptiken | 4-10 |
| 2.4 | Überwachungssensorik..... | 4-12 |
| | Linsen-Überwachungssensorik..... | 4-12 |
| | Überwachungssensorik des Auskoppelspiegels (OMS)..... | 4-12 |
| 2.5 | Polarisation | 4-13 |

Kapitel 5 Verfahren

| | | |
|-----|---|-----|
| 1. | Einsatzgebiete der CO ₂ -Laser | 5-3 |
| 2. | Laserschweißen | 5-6 |
| 2.1 | Prinzip des Laserschweißens | 5-6 |

| | | |
|-----------|--|-------------|
| 2.2 | Schweißverfahren | 5-8 |
| | Tiefschweißen | 5-9 |
| | Tiefschweißen mit Zusatzwerkstoffen..... | 5-11 |
| | Hybridverfahren | 5-11 |
| | Scannerschweißen | 5-12 |
| 2.3 | Merkmale des Verfahrens | 5-12 |
| | Nahtgeometrie und Nahtart..... | 5-13 |
| | Nahtvorbereitung | 5-15 |
| | Spannvorrichtungen..... | 5-17 |
| | Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit | 5-18 |
| | Strahlqualität und Brennweite | 5-19 |
| | Polarisation | 5-20 |
| 2.4 | Vorteile und Einsatzmöglichkeiten | 5-21 |
| 2.5 | Hochwertige Nähte erkennen | 5-24 |
| 2.6 | Maschinen und Anlagen..... | 5-27 |
| 3. | Laserschneiden..... | 5-28 |
| 3.1 | Prinzip des Laserschneidens | 5-28 |
| 3.2 | Schneidverfahren | 5-30 |
| | Schneiden mit Sauerstoff: Brennschneiden..... | 5-30 |
| | Schneiden mit Stickstoff: Schmelzschneiden | 5-31 |
| 3.3 | Schneidkriterien | 5-33 |
| | Rautiefe..... | 5-33 |
| | Schnittspaltform und Schnittspaltbreite | 5-33 |
| | Gratfreiheit | 5-35 |
| | Material und Laserleistung..... | 5-35 |
| | Betriebsart..... | 5-35 |
| | Schneidgeschwindigkeit..... | 5-36 |
| 3.4 | Vorteile und Einsatzmöglichkeiten | 5-39 |
| 3.5 | Maschinen und Anlagen..... | 5-41 |
| 4. | Mit dem Laser kennzeichnen und körnen | 5-42 |
| 5. | Mit dem Laser Oberflächen behandeln..... | 5-43 |
| 5.1 | Laserhärten mit CO ₂ -Laser | 5-44 |
| 5.2 | Umschmelzen | 5-45 |
| 5.3 | Legieren und Dispergieren..... | 5-46 |
| 5.4 | Beschichten..... | 5-48 |
| 6. | Direct Metal Deposition (DMD) | 5-50 |

Kapitel 6 Schneidbearbeitung von Rohren und Profilen

| | | |
|-----------|---|-------------|
| 1. | Rohre und Profile | 6-3 |
| 1.1 | Definitionen | 6-3 |
| 1.2 | Welche Querschnittsformen können mit dem Laser bearbeitet werden? | 6-3 |
| 1.3 | Qualität | 6-5 |
| 1.4 | Möglichkeiten und Grenzen bei der Rohrbearbeitung mit 2D- und 3D-Maschinen | 6-6 |
| 2. | Gekrümmte Flächen bearbeiten | 6-9 |
| 2.1 | Konturen polygonalisieren..... | 6-9 |
| 2.2 | Konturen "in der Ebene" bearbeiten | 6-11 |
| 2.3 | Abstandsregelung | 6-12 |
| 2.4 | Schneidabstand bei Rundrohren | 6-13 |
| 2.5 | Eckenbearbeitung bei Mehrkantrohren..... | 6-14 |
| | Schneidabstand korrigieren | 6-14 |
| | Vorschub reduzieren..... | 6-16 |
| 3. | Beeinflussung der Gegenseite | 6-17 |
| 4. | Rohrteile freischneiden | 6-18 |

Kapitel 7 Kriterien zur Beurteilung von Laserschnitten

| | | |
|-----------|---|-------------|
| 1. | Wie wird die Schnittqualität beurteilt?..... | 7-2 |
| 2. | Gratbildung | 7-3 |
| 3. | Schnittspalt..... | 7-4 |
| 4. | Kolkungen..... | 7-5 |
| 5. | Gemittelte Rautiefe | 7-6 |
| 6. | Rillennachlauf..... | 7-9 |
| 7. | Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz..... | 7-10 |

| | | |
|-----------|---------------------------------|-------------|
| 8. | Auswertungstabelle | 7-12 |
|-----------|---------------------------------|-------------|

Glossar

Index

Kapitel 1

Grundbegriffe der Lasertechnik

| | | |
|-----------|--|-------------|
| 1. | Laserprinzip | 1-2 |
| 1.1 | Anregungsmechanismen beim CO ₂ -Laser | 1-3 |
| 2. | Eigenschaften des Laserlichts | 1-5 |
| 3. | Strahlqualität | 1-6 |
| 3.1 | Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt | 1-7 |
| 4. | Lasertypen | 1-9 |
| 5. | Aufbau einer Strahlquelle | 1-10 |
| 6. | Bestandteile einer Laseranlage | 1-11 |
| 7. | Lasersicherheit..... | 1-13 |

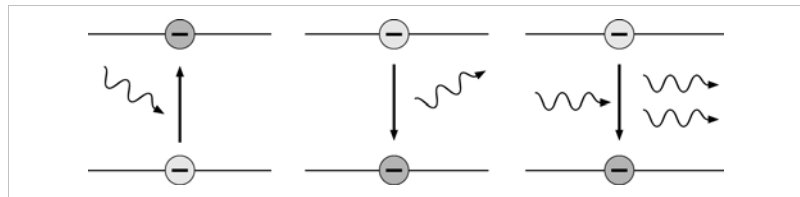
1. Laserprinzip

Der Begriff Laser ist ein amerikanisches Kunstwort und steht für light amplification by stimulated emission of radiation. Sinngemäß übersetzt bedeutet dies: Lichtverstärkung durch stimulierte Aussendung von Strahlung.

Ein Laser ist eine Strahlungsquelle, die charakteristische elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen Ultraviolett und Infrarot aussendet. Dies bedeutet, dass nicht jede von Lasern ausgesandte Strahlung für den Menschen sichtbar ist (sichtbarer Bereich: ca. 400 – 750 nm). Trotzdem wird die Laserstrahlung meistens als Licht bezeichnet.

Stimulierte Emission

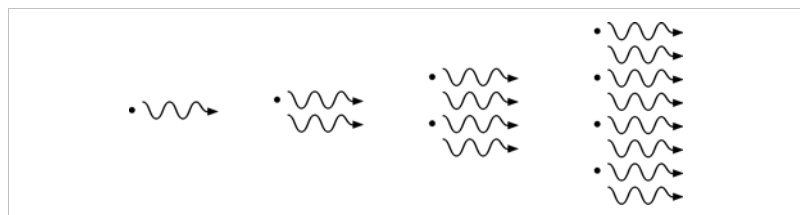
Bei der stimulierten Emission trifft ein Photon (kleinstes Energie- teilchen einer elektromagnetischen Strahlung) auf ein angeregtes Atom oder Molekül und stimuliert das Elektron, in ein niedrigeres Energieniveau überzugehen. Dabei sendet es ein weiteres Photon aus. Voraussetzung ist jedoch, dass das eintreffende Photon die passende Energie für diesen Prozess mitbringt. Die passende Energie hat es dann, wenn diese der Energiedifferenz zwischen dem angeregten Niveau und dem niedrigerem Niveau entspricht.



Anregung (links), spontane Emission (Mitte), stimulierte Emission (rechts)

Fig. 48000

Nach der stimulierten Emission hat das neue Photon genau die gleiche Frequenz und die gleiche Phasenlage wie das erste Photon und bewegt sich in die gleiche Richtung.



Durch die stimulierte Emission verstärkt sich die Laserstrahlung lawinenartig

Fig. 48001

Der Lichtstrahl ist verstärkt worden. Wo vorher nur ein Photon war, sind nun zwei gleichartige Photonen unterwegs. Wenn diese Photonen wieder auf angeregte Atome treffen, stoßen sie weitere Photonen los, der Lichtstrahl verstärkt sich weiter. Laser werden deshalb auch als Lichtverstärker bezeichnet.

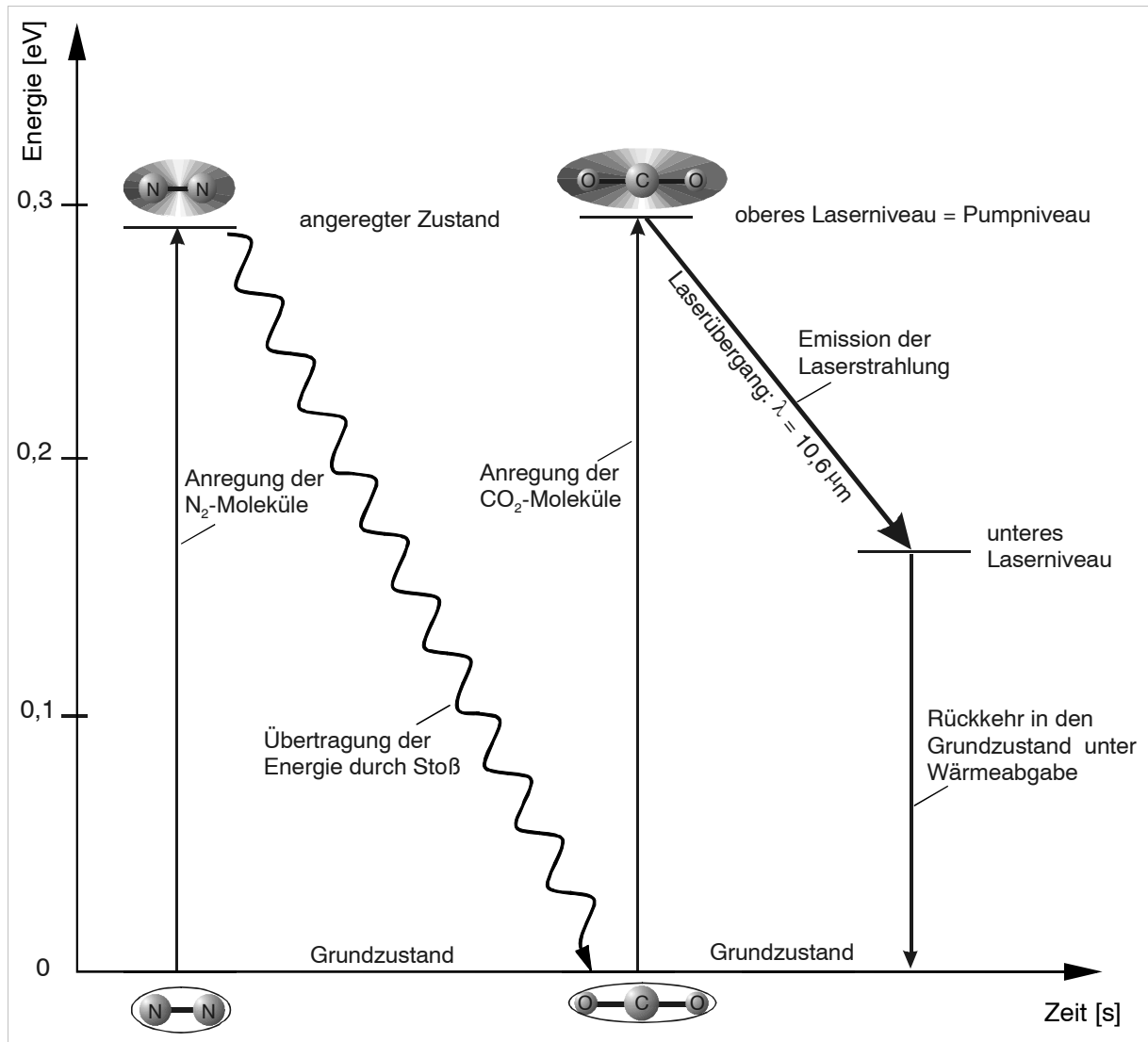
1.1 Anregungsmechanismen beim CO₂-Laser

Im CO₂-Laser senden CO₂-Moleküle das Laserlicht aus. Ein CO₂-Molekül besteht aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen. Sie bilden eine Kette, wobei das Kohlenstoffatom zwischen den Sauerstoffatomen sitzt. Wenn das Molekül angeregt wird, beginnt es zu schwingen. Die verschiedenen Schwingungsformen entsprechen unterschiedlich hohen Energieniveaus. Der Laserprozess im CO₂-Laser umfasst 4 Energieniveaus. Pumpniveau und oberes Laserniveau liegen sehr nahe beieinander.

Das laseraktive Medium besteht jedoch nicht nur aus CO₂. Es ist ein Gemisch aus Helium (He), Stickstoff (N₂) und Kohlendioxid (CO₂). Helium und Stickstoff sind Hilfsgase. Sie unterstützen den eigentlichen Laserprozess im CO₂-Molekül.

Im Detail Im Gasgemisch entstehen durch Gasentladung bei hoher Gleichspannung oder Hochfrequenz-Wechselspannung freie Elektronen, die die Stickstoff-Moleküle durch Stöße anregen. Die Stickstoff-Moleküle beginnen zu schwingen. Über Stöße geben sie ihre Energie an das CO₂-Molekül weiter und heben es vom Grundzustand ins obere Laserniveau - ein Schwingungszustand, bei dem alle drei Atome des Moleküls in Bewegung sind. Beim Übergang in das untere Laserniveau emittiert das CO₂-Molekül das Laserlicht mit einer Wellenlänge von 10,6 Mikrometern.

Von dort kehrt es unter Abgabe von Wärme in den Grundzustand zurück. Hier treten nun die Atome des Edelgases Helium in Aktion: Sie beschleunigen die Entleerung des unteren Laserniveaus durch Stöße mit den CO₂-Molekülen, nehmen die Wärme auf und leiten sie ab.

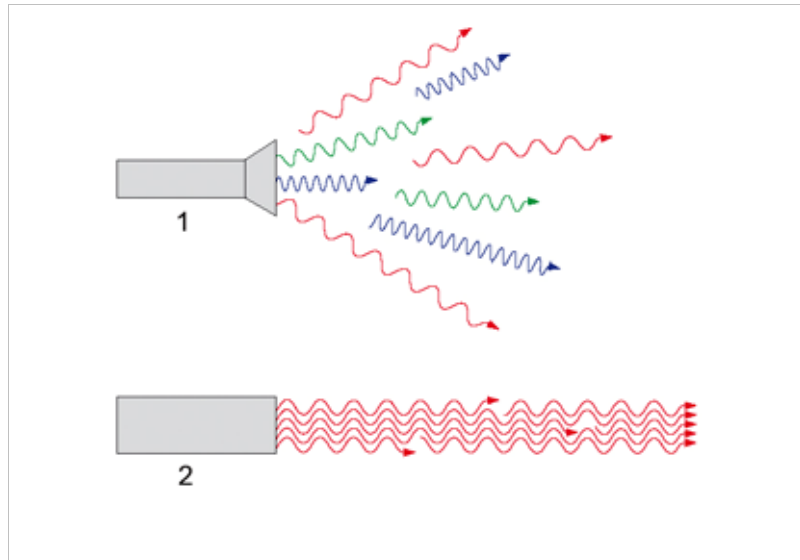


Energieschema

Fig. 24227

2. Eigenschaften des Laserlichts

Dass der Laser aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken ist, liegt an den besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung. Während das Licht natürlicher Lichtquellen, z. B. einer Kerze oder der Sonne, sich aus verschiedenen Wellenlängen zusammensetzt, ist das Laserlicht monochromatisch, kohärent und gerichtet. Diese Eigenschaften sind die Ursache dafür, dass der Laser für so viele Anwendungen eingesetzt werden kann.



Oben: Inkohärente Strahlung einer Lampe
Unten: Monochromatische, kohärente Laserstrahlung

Fig. 49057

Monochromatisch

Im Laserstrahl haben alle Photonen die gleiche Wellenlänge. Diese wird bestimmt durch die Energieübergänge in den Substanzen, die das Laserlicht aussenden. Monochromatisches Licht ist vor allem in Anwendungen gefragt, die mit Interferenzen arbeiten, zum Beispiel beim Abspielen einer CD oder in der Messtechnik.

Kohärent

Alle Photonen schwingen im Gleichtakt. Die Wellenzüge haben die gleiche Phasenlage. Dadurch entsteht ein zusammenhängender Laserstrahl. Die Kohärenz spielt ebenfalls immer dann eine Rolle, wenn Interferenzen technisch genutzt werden. Auch hier seien als Beispiele wieder die CD und die Messtechnik genannt.

Gerichtet

Die Photonen haben die gleiche Richtung. Sie laufen nahezu parallel. Dadurch bildet der Laserstrahl ein kompaktes Lichtbündel, das sich kaum aufweitet. So lässt sich der Laserstrahl besonders gut führen und die volle Leistung auf einen extrem kleinen Brennfleck fokussieren. Dies ist für die Materialbearbeitung essenziell.

3. Strahlqualität

Laserstrahlen sind zwar gerichtet, allerdings laufen die Lichtwellen nicht hundertprozentig parallel. Laserstrahlen besitzen eine Strahltaile und weiten sich danach zunehmend auf.

Ausbreitungseigenschaften und Fokussierbarkeit

Der Durchmesser der Strahltaile (engster Strahlquerschnitt) und der Öffnungswinkel (Divergenz) bestimmen das Ausbreitungsverhalten des Laserstrahls. Strahlen mit kleiner Taille und geringer Divergenz können auf einen relativ kleinen Fleck fokussiert werden und haben dabei eine hohe Schärfentiefe. Der Arbeitsabstand zwischen Linse und Werkstück kann dadurch relativ groß sein, was wünschenswert für Laseranwender wie -hersteller ist.

Geringere Öffnungswinkel bedeuten höhere Strahlqualität. Der geringstmögliche kann nur von Laserstrahlen mit Grundmode erreicht werden und hängt von der Wellenlänge ab.

Strahlparameterprodukt und M^2 -Wert

Das Strahlparameterprodukt (SPP) oder der M^2 -Wert (Beugungsmaßzahl) geben die Qualität des Strahls an. Beide Kennzahlen sind in der DIN EN ISO 11145 festgelegt.

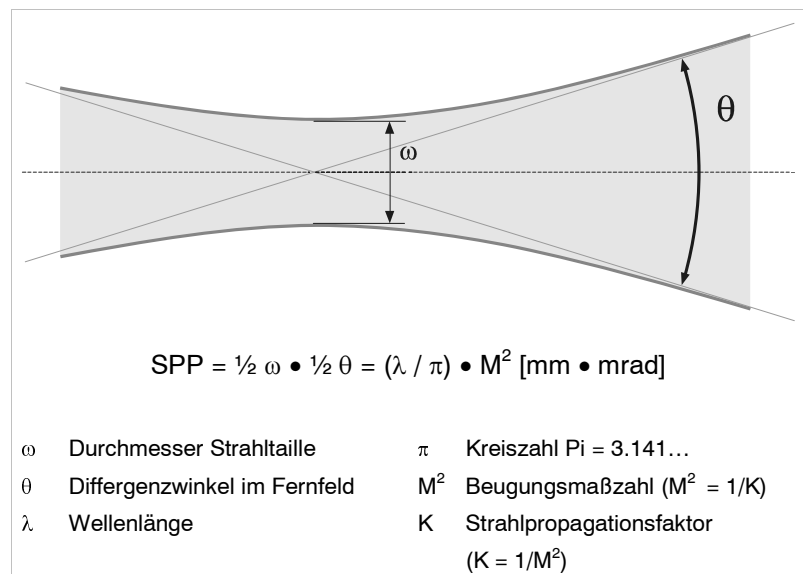


Fig. 48003

Beim Strahlparameterprodukt werden die zwei wichtigsten und leicht messbaren Strahlparameter miteinander multipliziert: Der Radius der Taille und der halbe Öffnungswinkel (Divergenzwinkel). Dabei gilt: Je kleiner das Strahlparameterprodukt, desto höher die Strahlqualität. Für CO₂-Laser liegt das erreichbare Minimum bei 3,4 Millimeter Milliradian (1 Milliradian entspricht einem Winkel von 0,057 Grad).

Die Beugungsmaßzahl M^2 beschreibt, wie stark das Strahlparameterprodukt des betrachteten Strahls von Optimum, dem Laserstrahl mit Grundmode, abweicht. Ihre Werte sind immer größer oder gleich 1. Ein Laserstrahl mit einem M^2 -Wert von 1 kann optimal fokussiert werden. M^2 und Strahlparameterprodukt lassen sich ineinander umrechnen.

Wann wird was eingesetzt?

Aus historischen Gründen wird die Strahlqualität von CO₂-Lasern in Europa meist mit der K-Zahl und in Übersee mit der Beugungsmaßzahl M^2 beschrieben. Die K-Zahl entspricht dem Kehrwert der Beugungsmaßzahl M^2 .

Um die Strahlqualität von Lasern mit der gleichen Wellenlänge zu vergleichen, kann man beide Kenngrößen verwenden. Werden jedoch Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen verglichen, muss das Strahlparameterprodukt verwendet werden. Der Grund ist, dass die Aussagen des Strahlparameterprodukts über die Ausbreitungseigenschaften und die Fokussierbarkeit von Laserstrahlen von deren Wellenlänge unabhängig sind.

3.1 Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt

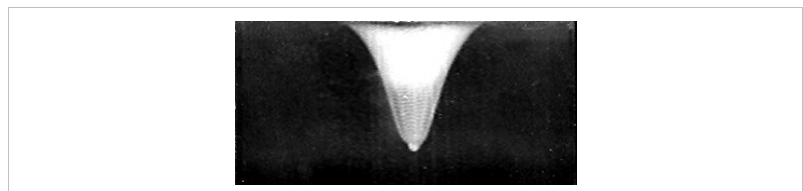
Der Laserstrahl besitzt im Quer- und Längsschnitt zur Strahlachse eine charakteristische Intensitätsverteilung (Energiedichte pro cm²). Diese Intensitätsverteilung im Querschnitt wird als Mode bezeichnet.

Moden TLF-Laser

Die beiden wichtigsten Moden bei CO₂-Lasern sind der Grundmode TEM₀₀ und die Modeform TEM₀₁*. TEM steht für transversaler elektromagnetischer Mode.

Grundmode TEM₀₀

Beim Grundmode TEM₀₀, der auch als Gauß-Mode bezeichnet wird, ist die Strahlungsintensität auf der Strahlachse am höchsten und nimmt gleichmäßig mit der Entfernung von der Strahlachse ab. Die Intensitätsverteilung entspricht einer gaußschen Normalverteilung. Ein Laserstrahl mit diesem Mode besitzt die geringste Divergenz. Diese Modeform findet man annähernd z. B. bei CO₂-Lasern mit Laserleistungen von 700 W bis 3 500 W, deren Einsatzgebiet schwerpunktmäßig das Laserschneiden ist.



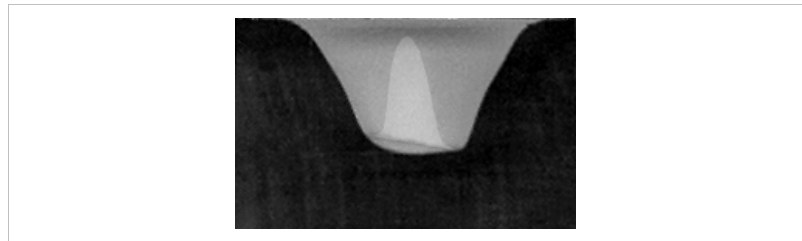
Modeschuss im Plexiglasquader: Beispiel Grundmode TEM₀₀ ($K \approx 0.9$, $M^2 \approx 1.1$)

Fig. 48217

Ring-Mode TEM_{01*}

Bei der Modeform TEM_{01*} , die auch als Ring-Mode bezeichnet wird, liegt auf der Strahlachse eine Nullstelle der Intensität, nach außen erreicht die Intensität zunächst ein Maximum und nimmt dann ab. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass die Intensitätsverteilung einer, in ihrem Maximum verbreiterten, gaußschen Normalverteilung entspricht. Die Verbreiterung kommt durch die Überlagerung der Moden TEM_{00} und TEM_{01*} zustande.

Diese Modeform findet Anwendung beim Schneiden oder auch beim Bohren, in den Fällen, wo Laser mit Laserleistungen zwischen 3 000 W und 7 000 W und Spiegeloptiken eingesetzt werden.

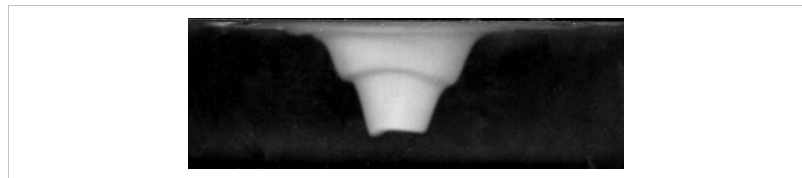


Modeschuss im Plexiglasquader: Beispiel Ring-Mode TEM_{01*} (Laser: TruFlow 4000, $K \approx 0.6$, $M^2 \approx 1.8$)

Fig. 48028

Multi-Mode

Ein Multi-Mode ist ein Mode höherer Ordnung. Er wird durch Überlagerung von mehreren Modeformen erzeugt, wie er bei Lasern mit Laserleistungen von 8 000 W bis 20 000 W auftreten kann. CO_2 -Laser mit dieser Modeform werden überwiegend beim Schweißen oder zum Oberflächen behandeln eingesetzt.



Modeschuss im Plexiglasquader: Beispiel Multi-Mode (Laser: TruFlow 15000, $K \approx 0.25$, $M^2 \approx 4$)

Fig. 48027

Modeschuss = Intensitätsverteilung sichtbar machen

Die Intensitätsverteilung im Querschnitt eines Laserstrahls wird im so genannten Modeschuss sichtbar. Der unfokussierte Strahl wird auf die Oberfläche eines Plexiglasquaders gelenkt. Dadurch entsteht dort eine charakteristische Vertiefung, die der Intensitätsverteilung im Querschnitt des Laserstrahls entspricht.

4. Lasertypen

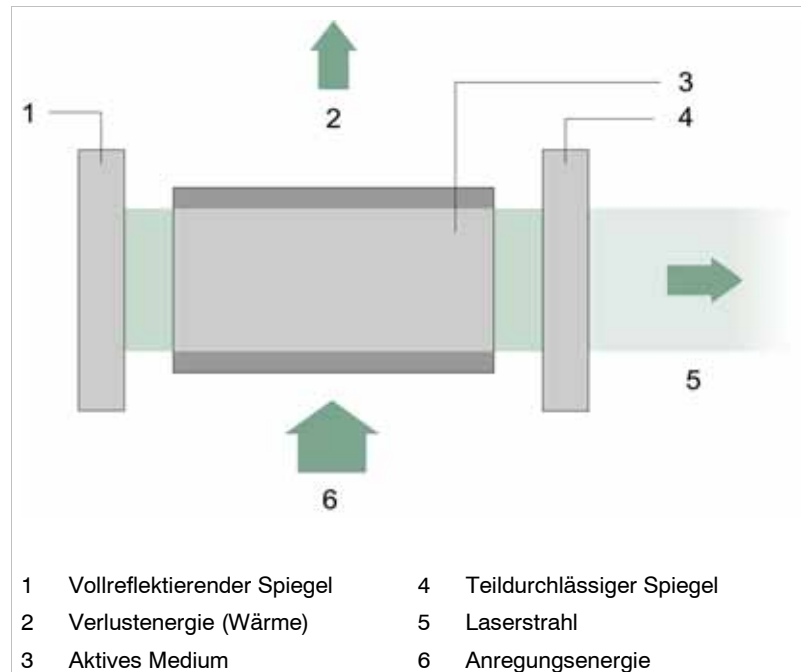
Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die wichtigsten Lasertypen, den Wellenlängen ihrer emittierten Strahlung sowie Hinweise zur Anwendung.

| Lasertypen | Laseraktives Material | Wellenlänge [μm] | Anwendungen / Einsatzbereiche / Anmerkungen |
|------------------------|---|------------------------------------|--|
| Gaslaser | Stickstoff | 0.3371 | Optische Pumpquelle für Farbstofflaser |
| | Excimer (Edelgas-Halogenid-Laser): ArF KrF XeCl XeF | 0.1931 0.2484 0.308 0.351 | <ul style="list-style-type: none"> Optische Pumpquelle für Farbstofflaser Materialbearbeitung von Kunststoff, Glas und Keramik Spektroskopie Medizin Messtechnik |
| | Helium-Neon (He:Ne) | 0.6328 | <ul style="list-style-type: none"> Messtechnik Holografie Justage |
| | Argon (Ar) ⁺ | 0.3511-0.5287 | <ul style="list-style-type: none"> Optische Pumpquelle für Farbstofflaser Messtechnik Holografie Spektroskopie Medizin |
| | Krypton (Kr) ⁺ | 0.324-0.858 | <ul style="list-style-type: none"> Optische Pumpquelle für Farbstofflaser Spektroskopie Medizin Fotolithografie |
| | Kohlendioxid (CO ₂) | 10.6 | <ul style="list-style-type: none"> Materialbearbeitung Spektroskopie Medizin |
| Festkörperlaser | Rubin (Cr ³⁺ :Al ₂ O ₃) | 0.694 | <ul style="list-style-type: none"> Medizin Lidar Materialbearbeitung Erster technisch realisierter Laser (1960) |
| | Neodym:Glas (Nd:Glas) | 1.062 | <ul style="list-style-type: none"> Materialbearbeitung Plasmaforschung Fotochemie |
| | Neodym:YAG (Nd:YAG) | 1.063 1.064 | <ul style="list-style-type: none"> Materialbearbeitung Medizin |
| | Alexandrit | 0.755 | Medizin |
| Diodenlaser | GaAlAs / GaAs | 0.635-0.910 | <ul style="list-style-type: none"> Optische Pumpquelle für Nd:YAG-Laser Optische Nachrichtentechnik Audiotechnik Laserdrucker Messtechnik Medizin Bei höheren Leistungen (im kW-Bereich) auch Materialbearbeitung |
| | InGaAsP / InP | 1.3 | |
| | InGaAlAs | 1.5 | |
| Farbstofflaser | Organische Farbstoffe in stark verdünnter Lösung | Durchstimmbare von 0.31-1.28 | |

Tab. 1-1

5. Aufbau einer Strahlquelle

Die Laserstrahlen entstehen alle nach dem gleichen physikalischen Prinzip. Deshalb befinden sich in allen Strahlquellen die gleichen funktionalen Bestandteile.



Grundlegende Bestandteile eines Lasers

Fig. 48002

Aktives Medium

Das aktive Medium ist die Substanz, die das Laserlicht emittiert und in der es verstärkt wird. Es eignen sich Gase, feste Stoffe und auch Flüssigkeit. Die Grundvoraussetzung ist, dass die Stoffe Licht - genauer gesagt: elektromagnetische Strahlung mit einer bestimmten Wellenlänge - aussenden, wenn sie angeregt werden und von angeregten Zuständen wieder in energetisch niedrigere Zustände übergehen.

Resonator

Im Resonator wird das Licht wieder und wieder in das aktive Medium zurückreflektiert. Im einfachsten Fall kann dies durch zwei Spiegel geschehen. Er bestimmt die Ausbreitungsrichtung des Laserlichts und sorgt für die ausreichende Verstärkung des Laserstrahls durch stimulierte Emission.

Anregung

Damit das aktive Medium Laserlicht aussenden kann, muss Energie zugeführt werden, um es anzuregen. Dieser Vorgang wird auch als Pumpen bezeichnet. Jede Strahlquelle braucht eine Pumpquelle, die dem aktiven Medium optische, elektrische oder chemische Energie zuführt. Beim CO₂-Laser ist dies zum Beispiel hochfrequente Wechselspannung.



Kühlung Genauso wichtig wie die Anregung ist die Kühlung des aktiven Mediums. Ein großer Teil der Anregungsenergie wird nicht in Laserlicht, sondern in Wärme umgewandelt. Die Wärme muss abgeleitet werden, da sich ansonsten das aktive Medium und der Resonator zu sehr erwärmen würden.

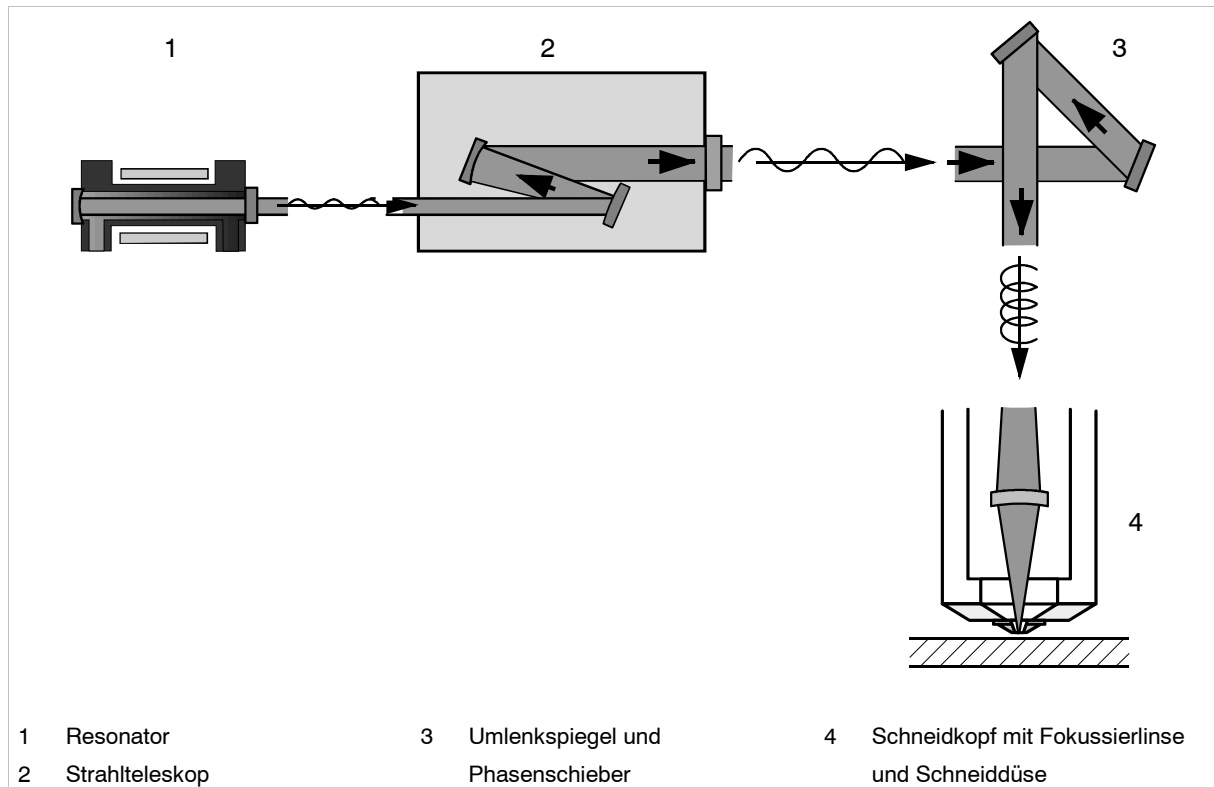
Weitere Bestandteile Um einen Laserstrahl erzeugen zu können, braucht die Strahlquelle darüber hinaus noch viele weitere Elemente, die sie mit Energie und bei Bedarf mit Zusatzstoffen wie Gas und Kühlwasser versorgen.

6. Bestandteile einer Laseranlage

Der kompakten Bauweise von Laseranlagen sieht man meist nicht an, wie viele verschiedene Bauteile benötigt werden, um mit dem Laserstrahl ein Werkstück je nach Bearbeitungsaufgabe optimal zu bearbeiten.

Auf dem Weg zum Werkstück wird der Laserstrahl geformt, geführt und schließlich fokussiert. Dazu werden je nach Lasertyp und Bearbeitungsaufgabe verschiedene Bauteile benötigt:

- Strahlschutzrohre und Faltenbälge, die den Laserstrahl umgeben und abschirmen.
- Ebene Spiegel zum Umlenken des Laserstrahls oder um den Laserstrahl an mehrere Arbeitsstationen zu führen.
- Teildurchlässige Spiegel, um den Laserstrahl zu teilen.
- Gewölbte Spiegel zum Formen und Fokussieren.
- Linsen zum Formen und Fokussieren.
- Einen Phasenschieber, wenn die Schwingungsrichtung des CO₂-Laserlichts verändert werden soll.



Strahlführung zwischen Resonator und Werkstück

Fig. 25237

Grundmaschine

Der Laserstrahl schneidet metergroße, flache Blechtafeln genauso leicht wie kleine Halbleiterplatten oder dreidimensionale Werkstücke. Er kann das jedoch nur, wenn die Optik ihn entsprechend bündelt und die Maschine, die ihn führt, alle dazu nötigen Bewegungen erlaubt. Die Ausführung der Maschine oder Anlage bestimmt das Werkstückspektrum, das der Laser schneiden oder auch schweißen kann.

Je nachdem, ob geschnitten oder geschweißt werden soll, kommen verschiedene Maschinen zum Einsatz. Konturen in der Ebene werden mit 2D-Lasermaschinen geschnitten, dreidimensionale Konturen benötigen die Beweglichkeit einer 3D-Lasermaschine. Rohre, die in einer bestimmten Länge abgeschnitten werden sollen, werden auf 2D-Lasermaschinen bearbeitet. Aber auch Roboter kommen beim Schneiden immer mehr zur Anwendung, denn sie sind eine günstige Alternative zur 3D-Anlage.

Den Einsatz von Robotern beim Schweißen kennt man schon lange aus der Automobilindustrie.

7. Lasersicherheit

Das Arbeiten mit dem Laser birgt jedoch auch einige Risiken. Primär gefährdete Körperteile des Menschen sind die Haut und die Augen. Um diese Risiken weitestgehend zu minimieren, werden unterschiedliche, konstruktive Maßnahmen an den Lasermaschinen durchgeführt, um die Laserklasse 1 zu erreichen:

- Integration des Lasers in den Maschinenrahmen und Kapse-
lung der Strahlführung bis zum Laser-Bearbeitungskopf.
- Strahlschutz am Laser-Bearbeitungskopf (kombinierter Strahl-
und Schlackenspritzschutz).
- Abgrenzung durch Lichtschranken, die mit dem Sicherheits-
kreis der Maschine gekoppelt sind.
- Umhausung des Laser-Bearbeitungsbereichs durch eine ge-
schlossene Kabine.

Das Aufführen aller Sicherheitsmaßnahmen würde an dieser Stelle zu weit führen. Alles Wichtige zum Thema "Lasersicherheit" wurde in der Technischen Information "Sicherheitsleitfaden für Lasereinrichtungen und Laser-Bearbeitungsmaschinen" zusammengefasst.



Kapitel 2

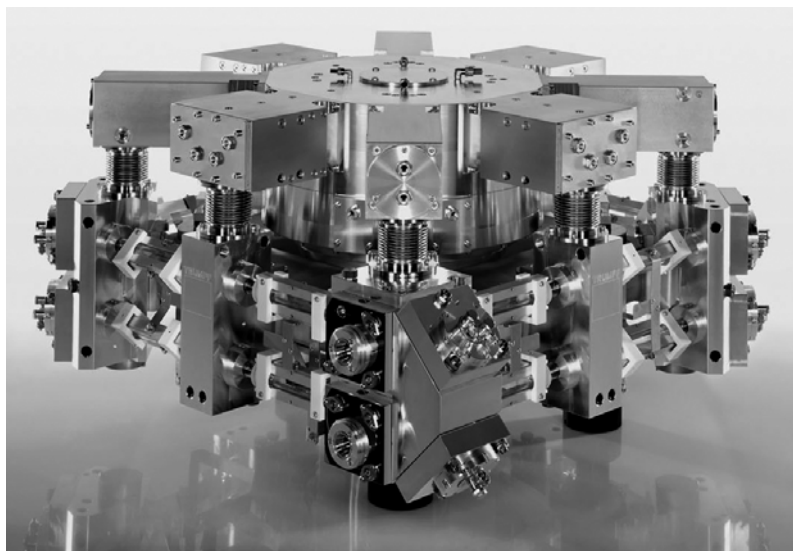
TRUMPF CO₂-Laser

| | | |
|-----|--|------|
| 1. | Ein Werkzeug für die Industrie | 2-2 |
| 2. | Kompakter Aufbau des CO ₂ -Lasers | 2-3 |
| 3. | Zwei Konzepte für CO ₂ -Laser..... | 2-4 |
| 3.1 | Geströimte CO ₂ -Laser | 2-4 |
| 3.2 | Diffusionsgekühlte CO ₂ -Laser | 2-6 |
| 4. | Anregung | 2-9 |
| 5. | Betriebsarten | 2-10 |

1. Ein Werkzeug für die Industrie

CO₂-Laser haben sich als zuverlässige und belastbare Strahlquellen erwiesen und sind dadurch eine feste Größe in der Materialbearbeitung geworden. Weltweit sind einige zehntausend Strahlquellen im Einsatz. Die meisten davon werden zum Schneiden und Schweißen genutzt. Die Wellenlänge des CO₂-Lasers liegt im fernen Infrarot und beträgt 10,6 Mikrometer.

- Merkmale**
- Großer Leistungsbereich, von unter 10 Watt bis über 20 000 Watt.
 - Hohe Strahlqualitäten, M^2 von 1,1 bis 5,0 (K-Werte von 0,9 bis 0,2; Strahlparameterprodukt von 4 bis 17 Millimeter Milliradian).
 - Wählbare Betriebsart: Dauerstrichbetrieb oder gepulst.
 - Prozesssicherheit durch hohe Leistungskonstanz.
 - Einsatz des CO₂-Lasers in unterschiedlichsten Aufgabenbereichen durch anpassbare Leistung und anpassbarem Leistungsverlauf (Pulsbetrieb).
 - Eine gleichmäßige Bearbeitung des Werkstücks ist möglich durch eine gleichmäßige Intensitätsverteilung, bezogen auf den Strahlquerschnitt, und eine hohe Modestabilität, d.h. stabile Intensitätsverteilung des Laserstrahls.
 - Geringer Energieverbrauch durch hohen quantenoptischen Wirkungsgrad von ca. 30 %.
 - Einfache Integration der CO₂-Laser in bestehende Maschinenkonzepte durch kompakten Aufbau.

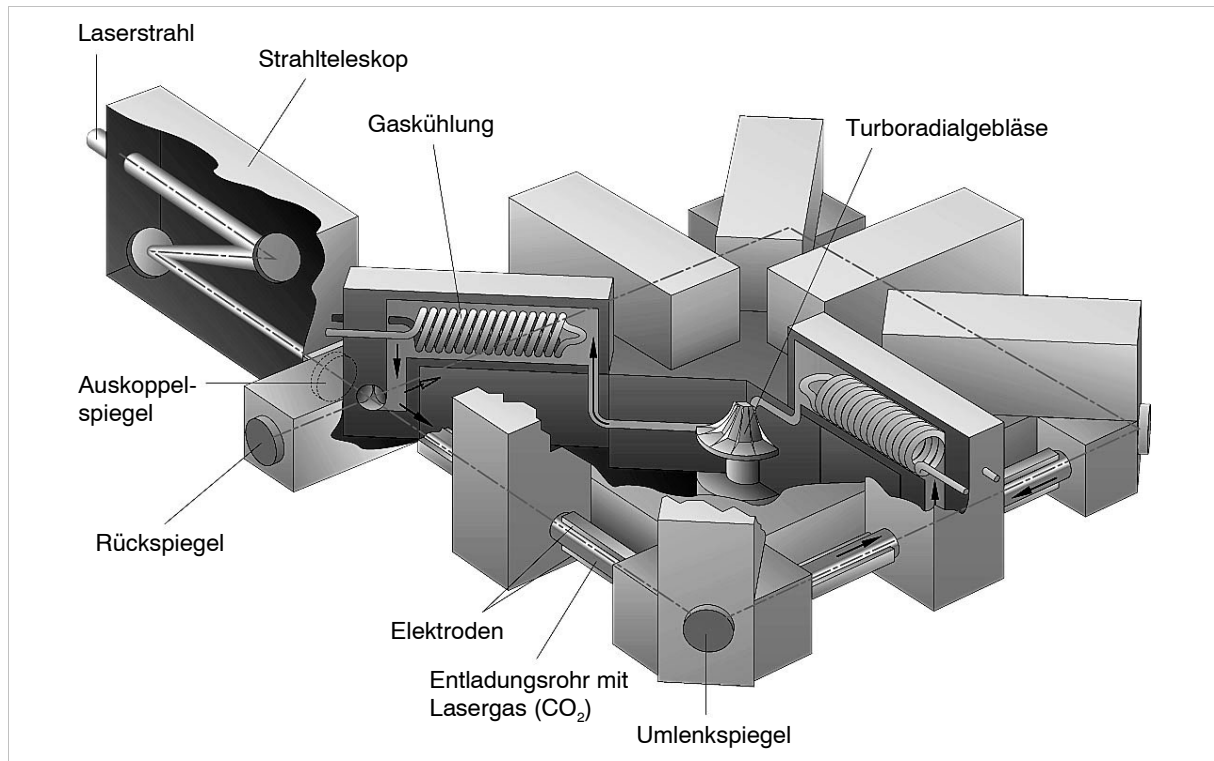


Beispiel eines CO₂ -Lasers

Fig. 48029

2. Kompakter Aufbau des CO₂-Lasers

- Merkmale**
- Faltung des Resonators.
 - Integration der Lasergasumwälzung.
 - Integration der Lasergaskühlung.



CO₂-Laser im Überblick mit Strahlteleskop

Fig. 24346

- Vorteile**
- Hohe mechanische Stabilität.
 - Geringes Gewicht.
 - Geringer Platzbedarf.

3. Zwei Konzepte für CO₂-Laser

In diesem Abschnitt werden 2 Konzepte für CO₂-Laser vorgestellt. Beide werden mit hochfrequentem Wechselstrom gepumpt. Die Kühlung und die Resonatorform sind jedoch verschieden.

3.1 Geströimte CO₂-Laser

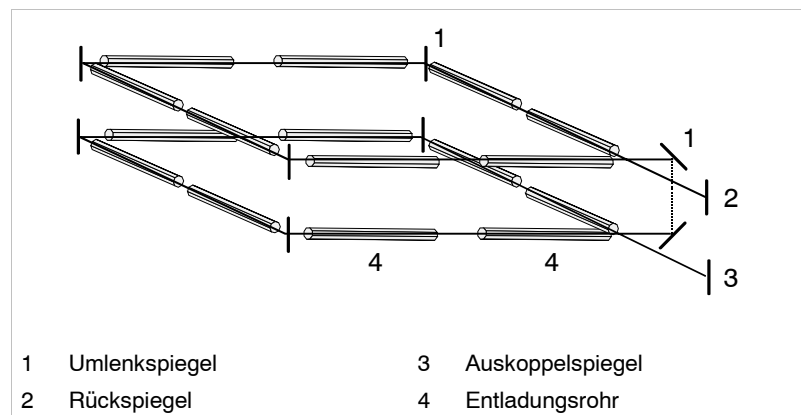
Quadratischer Aufbau

Geströimte CO₂-Laser von TRUMPF sind quadratisch aufgebaut. Dadurch sind sie kompakt, robust und zuverlässig und liefern - je nach Ausbaustufe - Laserstrahlen mit bis zu 20 000 W Leistung.

Die Entladungsstrecke besteht aus Quarzglas-Rohren, in denen sich auch das Lasergas befindet. Außen an den Rohren sitzen Elektroden, die die Anregungsenergie berührungslos in das Lasergas einkoppeln. Für Laserleistungen von mehreren Kilowatt muss die Entladungsstrecke mehrere Meter lang sein. Um trotzdem kompakte Außenmaße zu erreichen, werden die Entladungsstrecken gefaltet und zum Beispiel quadratisch, bei hohen Laserleistungen auch in zwei Ebenen, angeordnet. Umlenkspiegel reflektieren den Laserstrahl an den Ecken des Quadrats und verbinden die Entladungsstrecken optisch. Rückspiegel und Auskoppelspiegel vervollständigen den Resonator.

Gefalteter Resonator

Man nennt die Umlenkung des Strahls auch "Faltung", den Resonator bezeichnet man dann als "gefalteten Resonator".



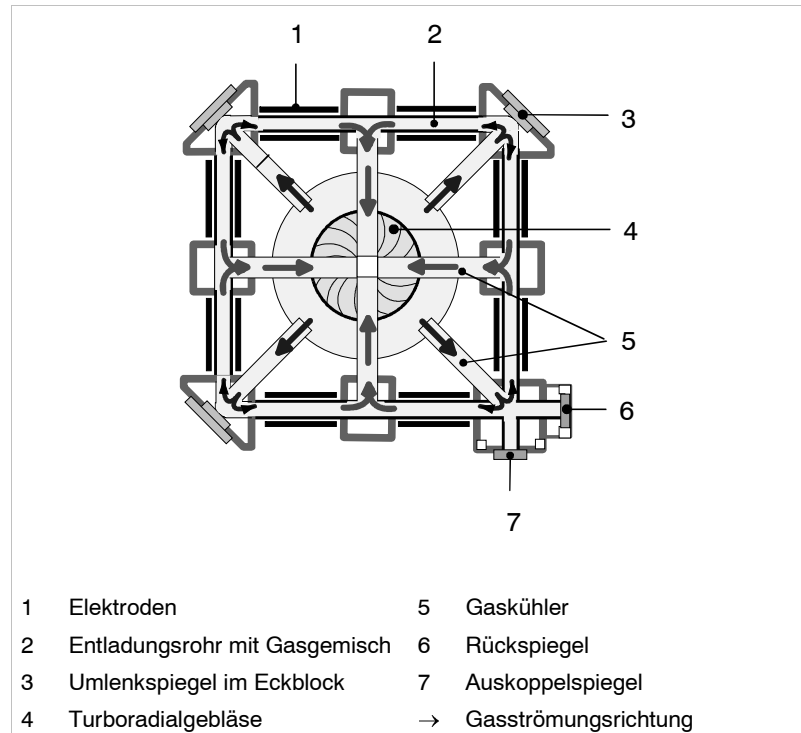
Quadratisch gefalteter Resonator mit zwei Entladungsebenen Fig. 24230

Vorteile des symmetrischen Aufbaus:

- Minimale Empfindlichkeiten gegenüber Temperaturänderungen.
- Symmetrische Gasströmung/Verteilung der elektrischen Energie für maximale Laserleistung und -stabilität.
- Hervorragende Strahlqualität.

Turboradialgebläse

In der Mitte der Strahlquelle sitzt ein magnetgelagertes Turboradialgebläse. Dieses wälzt das Lasergas ständig um. Das Gas strömt an den Ecken des Quadrates in die Entladungsrohre und wird in der Mitte jeder Seite wieder abgesaugt. In den Zu- und Ableitungsgehäusen umströmt das Gas wassergekühlte Wärmetauscher und kühlt ab. Der Gasmischer mischt das Lasergas aus Kohlendioxid, Helium und Stickstoff. Für den richtigen Betriebsdruck sorgt die Vakuumpumpe. Sie hält den Gasdruck bei etwa 100 Hektopascal.



Gasströmungsrichtung im CO₂-Laser

Fig. 25238

Vorteile schnellgeströmter Laser

- **Höhere Laserleistung:** Die höhere Gasströmung pro Zeitintervall erlaubt eine höhere Laserleistung bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen.
- **Weniger Gaskühlung:** Die höhere Gasströmungsgeschwindigkeit hat eine geringere Verweilzeit des Gases in der Entladungsstrecke zur Folge. Das Gas heizt sich weniger auf und muss dadurch weniger gekühlt werden.

Strahleigenschaften

Der ausgekoppelte Laserstrahl hat einen kreisförmigen Querschnitt und eine hohe Strahlqualität. Welche Moden anschwingen, hängt vom Durchmesser der Quarzröhren im Resonator sowie von der Form der Spiegel ab: Grundmode, Ring-Mode oder Multi-Moden lassen sich verwirklichen.

3.2 Diffusionsgekühlte CO₂-Laser

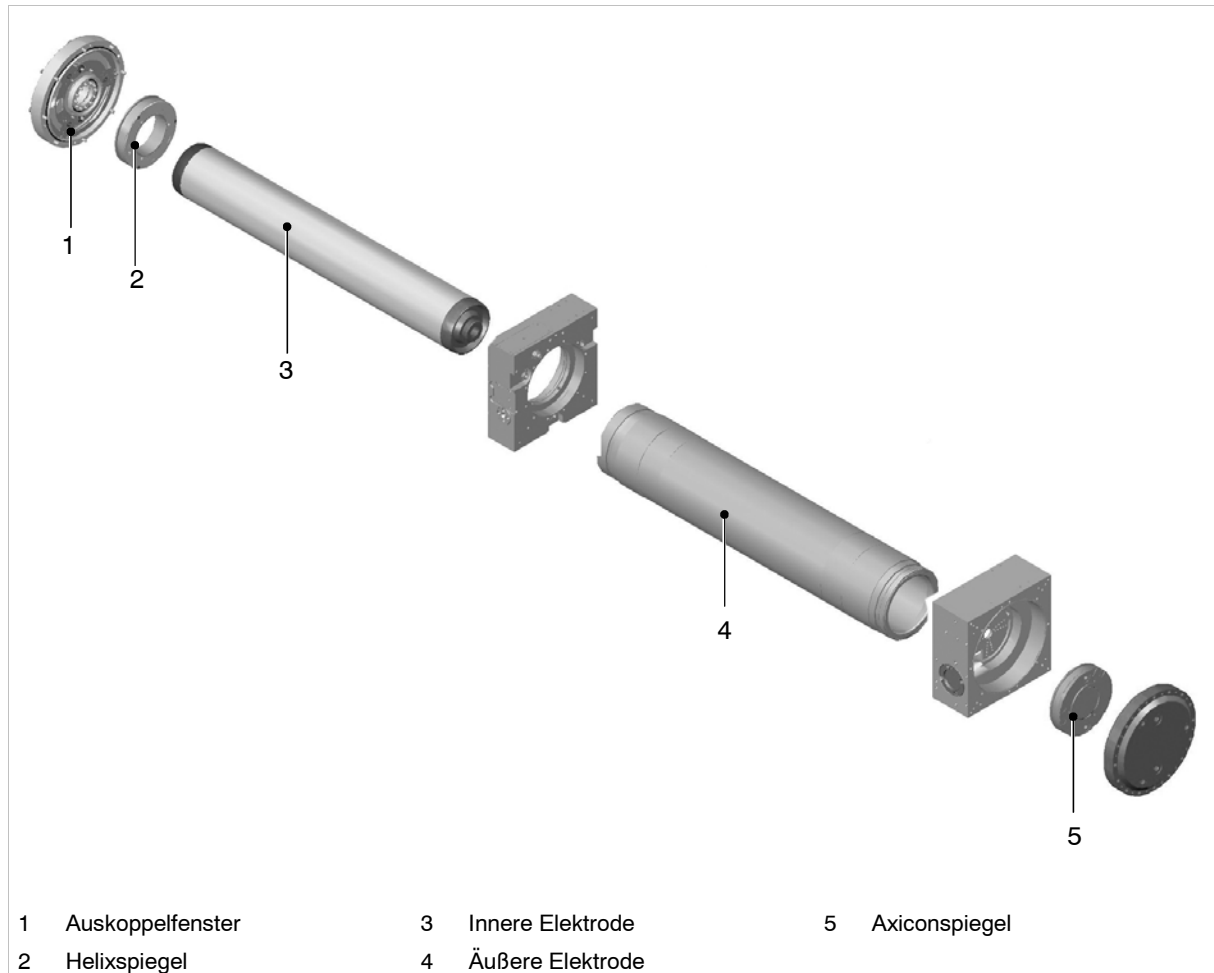
Diffusionsgekühlte Laser, auch Coax-Laser genannt, sind in dieser Form seit 2003 auf dem Markt. Sie werden immer dann eingesetzt, wenn Kompaktheit im mittleren Leistungsbereich bei hoher Strahlqualität gefragt ist. Dies ist zum Beispiel bei Stanz-Laser-Kombimaschinen der Fall. Hier findet der Coax-Laser auf dem Maschinenrahmen Platz.

- Premix-Gasflasche** Die Gasflasche mit dem bereits vorgemischten Lasergas ist über ein Ventil ständig mit dem Resonator verbunden. Nach spätestens 72 Stunden wird das Lasergas im Resonator automatisch ausgetauscht. Da das Füllvolumen des Resonators sehr gering ist, reicht die im Gehäuse integrierte Gasflasche für ca. 1,5 bis 2 Jahre.
- Diffusionskühlung** Beim diffusionsgekühlten CO₂-Laser gibt es keine Gasumwälzung. Stattdessen gibt das Lasergas die Wärme über die Resonatorwände ab (Diffusionskühlung). Damit die Wärme effektiv abgeführt werden kann, muss der Abstand zwischen den Resonatorwänden möglichst gering und die Wandfläche möglichst groß sein. Dennoch ist ein bestimmtes Gasvolumen nötig, um hohe Laserleistungen zu erreichen.

Kompakter Aufbau

Mit dem Coax-Laser werden ein kompakter Aufbau und Leistungen im Kilowattbereich erreicht.

Der Resonator besteht aus 2 koaxial ineinander angeordneten Metallrohren, die wassergekühlt sind. Sie dienen gleichzeitig als Hochfrequenz-Elektroden. Der Raum zwischen den Rohren bildet die Entladungsstrecke, in der sich das Lasergas befindet.



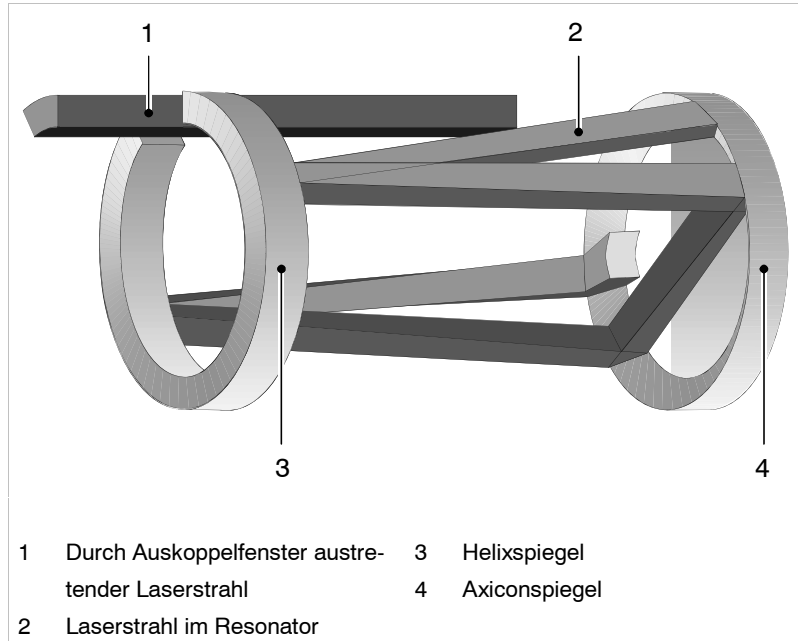
Aufbau des Resonators

Fig. 37388

An der Rückseite befindet sich der Rückspiegel, ein so genannter Axiconspiegel. Seine ringförmige Spiegelfläche ist um 45° zur Ebene geneigt. Gegenüberliegende Spiegelflächen bilden einen 90° -Winkel. Dies bedeutet, dass der auftreffende Laserstrahl zur gegenüberliegenden Seite des Rings reflektiert wird und von dort zurück in den Rohrzwischenraum gelangt. Einfallender und reflektierter Strahl laufen parallel zueinander.

Auf der anderen Seite des Resonators trifft der Strahl auf einen Helixspiegel. Dieser ist ebenfalls ringförmig, seine Spiegelfläche hat eine Steigung und er hat eine Öffnung, aus der ein Teil des Strahlungsfeldes als Laserstrahl ausgekoppelt wird. Durch die Steigung des Helixspiegels wird der Strahl unter einem größeren Winkel reflektiert und der Strahl beginnt, zickzackförmig hin- und herzulaufen. Ein stabiles Strahlungsfeld entsteht.

Strahlgang beim Coax-Laser



Strahlgang im Resonator

Fig. 37401

Strahleigenschaften

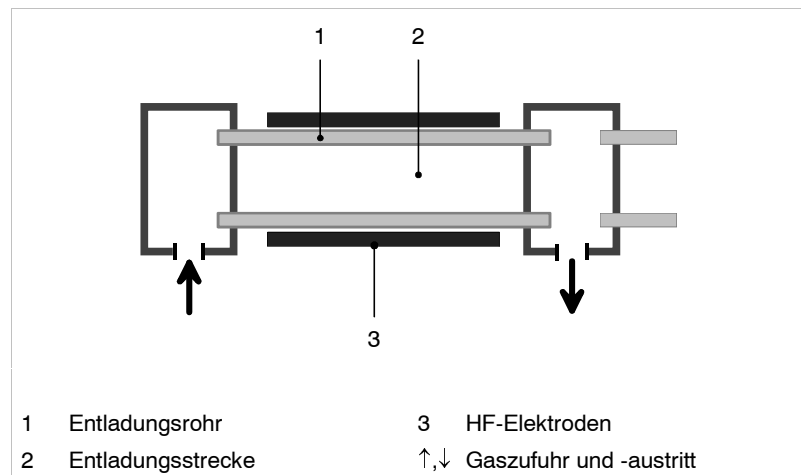
Der ausgekoppelte Strahl hat den Querschnitt eines Kreissegments und lässt sich nicht so führen und fokussieren, wie es für die Materialbearbeitung erforderlich ist. Deshalb wird er noch in der Strahlquelle geformt, mit Hilfe mehrerer, zylindrisch gewölbter Spiegel. Wenn er die Strahlquelle verlässt, ist er symmetrisch und hat eine hohe Strahlqualität von M^2 gleich 1,1 (K gleich 0,9).

Um den Mode des Strahls vollständig zu beschreiben, muss man die zwei Richtungen des Resonators betrachten: Die stabile und instabile. In der stabilen Richtung, zwischen den Rohrwänden, bildet sich ein Gauß-Mode. In der instabilen Richtung, um die Achse herum, hat der Mode keine eindeutige Form. Im Modeschuss des ungeformten Strahls zeigt sich ein unregelmäßiges Gebilde.

4. Anregung

Das Lasergas wird bei CO₂-Lasern durch die Einkopplung elektrischer Energie angeregt. Diese Energie liefern Hochfrequenzgeneratoren. Sie erzeugen hochfrequente Wechselspannung.

Der Vorteil der Hochfrequenzanregung besteht darin, dass die Elektroden, mit denen die Energie in das Lasergas eingekoppelt wird, außerhalb des Resonators sitzen und dadurch nicht verschleifen. Hohe Frequenzen sind nötig, damit zwischen den Elektroden Strom fließt. Der Stromfluss steigt mit zunehmender Frequenz. Gebräuchlich sind 13,56 MHz für geströimte und 27,12 MHz für diffusionsgekühlte Laser.



Hochfrequenzanregung

Fig. 25239

Unterscheidung des Laser-Generators zu anderen Generatoren

- Schnelle Lastwechsel sind möglich, denn er benötigt je nach Betriebszustand unterschiedlich viel Energie.
- Er ist pulsbar, denn so wird die Laserleistung geregelt.
- Er lässt sich über die Lasersteuerung ansprechen.

Vorteile der HF-Anregung

- **Leistungskonstanz:** Die resultierende homogene Gasentladung ist Voraussetzung für die Leistungskonstanz des Lasers.
- **Geringerer Gasverbrauch:** Für die Anregung des Gasgemisches wird eine geringere Spannung benötigt als bei Einkopplung der Energie über eine Gleichspannungsquelle. Folge ist ein geringerer Zerfall des CO₂-Gases und damit ein geringerer Gasverbrauch. Gleichzeitig wird das Gefährdungspotential durch Stromschlag reduziert.
- **Kein Elektrodenverschleiß:** Da die Elektroden nicht direkt mit dem Lasermedium in Berührung stehen und damit keiner Gasentladung ausgesetzt sind, ist kein Elektrodenverschleiß zu berücksichtigen. Außerdem kann Elektrodenmaterial den Resonator (Spiegel, Glasrohre) nicht verschmutzen, Wartungsaufwand und Gasverbrauch werden reduziert.

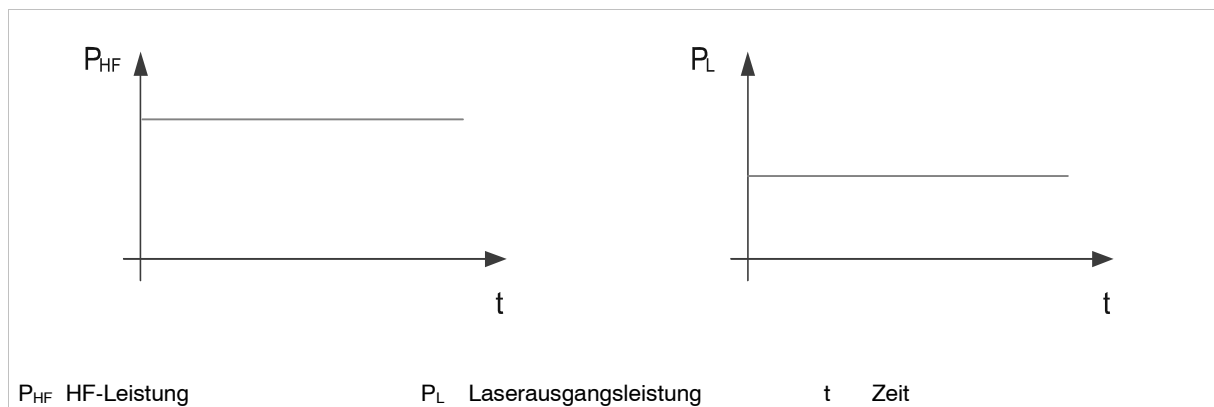
Eine andere Möglichkeit ist das Anlegen einer Gleichspannung. Bei Gleichstromanregung befinden sich die Elektroden innerhalb des Resonators. An den Elektroden liegt eine hohe Gleichspannung an. Nachteil: Die Elektroden verschleifen.

5. Betriebsarten

Die Betriebsart wird von der Anwendung bestimmt. Zum Tiefschweißen langer Nähte z. B. wird der kontinuierliche Laserstrahl benötigt. Für das Punktschweißen sind kurze Pulse geeignet. Folgende Betriebsarten werden eingesetzt:

- Dauerstrichbetrieb (cw-Betrieb, cw = continuous wave)
- Pulsbetrieb
- Rampenbetrieb

Dauerstrichbetrieb Im Dauerstrichbetrieb wird der Laserstrahl unter konstanter Energiezufuhr kontinuierlich erzeugt. Der Laser sendet Laserlicht von konstanter Leistung.



Dauerstrichbetrieb: Zeitverlauf von Anregungs- und Laserausgangsleistung

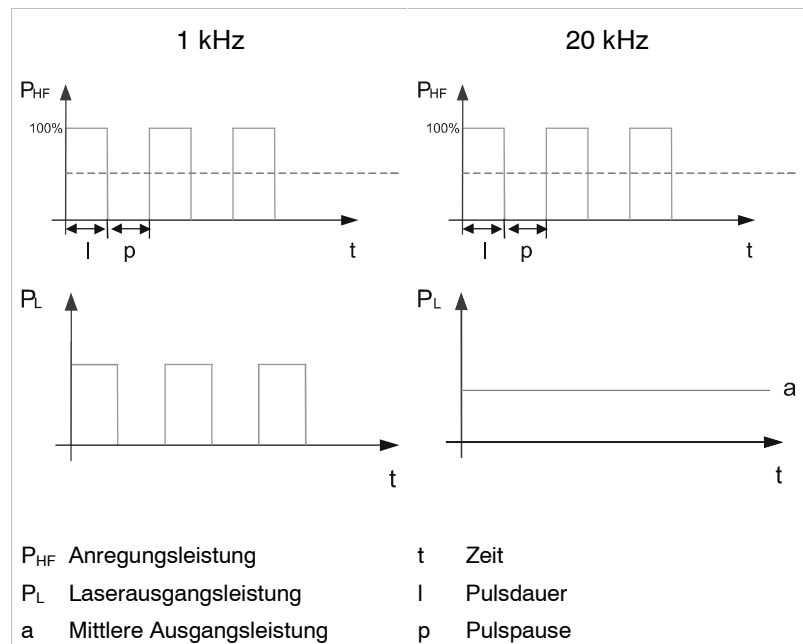
Fig. 25240

Pulsbetrieb

Im Pulsbetrieb wird das aktive Medium in Pulsen angeregt und erzeugt kurze Laserpulse. Anregung (Pulsdauer) und Anregungspausen (Pausenlänge) wechseln sich in kurzen Zeitintervallen ab. Dabei werden Pulse mit der Maximalleistung erzeugt. Die mittlere Ausgangsleistung des Lasers wird durch das Verhältnis von Pulsdauer zu Pausenlänge geregelt.

Beispiel:

Die Ausgangsleistung beträgt 3000 W. Der Laser erzeugt in einer Sekunde 1000 Pulse von jeweils 0.0005 Sekunden Dauer. Zwischen zwei Pulsen liegt eine Pause von 0.0005 Sekunden, in der kein Laserlicht ausgesendet wird. Die mittlere Ausgangsleistung beträgt dann 1500 W.



Pulsbetrieb: Zeitverlauf von Anregungs- und Laserleistung

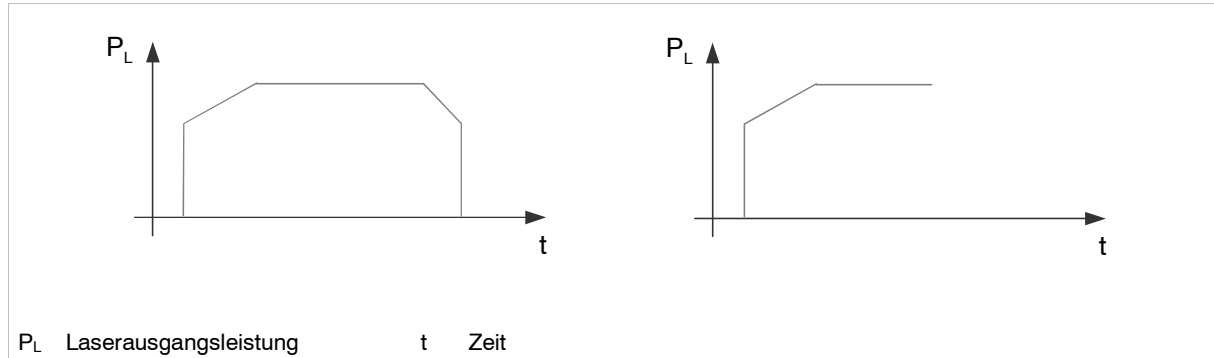
Fig. 48254-48256

Lasergas besitzt die Eigenschaft, die Anregungsenergie kurz zu speichern. Ist die Anregungsfrequenz hoch (ca. 20 kHz), reicht die Energie aus, die Pausen zu überbrücken und ein Laserstrahl mit konstanter Leistung wird erzeugt. Bei niedriger Anregungsfrequenz (1 kHz) reicht die Energie dazu nicht aus und einzelne Pulse werden erzeugt.

Auf diese Weise lassen sich die Laserausgangsleistungen und der Leistungsverlauf gut steuern und die Pulse werden genau auf den Bearbeitungsprozess abgestimmt. Vor allem bei sehr niedrigen Laserleistungen wird dieser Vorteil genutzt. Es können z. B. sehr kleine Konturen oder filigrane Stege in Blechtafeln geschnitten werden, deren Durchmesser bzw. Breite kleiner ist als die Blechdicke.

Ramp-Betrieb

Beim Ramp-Betrieb wird die Laserleistung kontinuierlich über ein programmierbares Zeitintervall gesteigert und anschließend wieder reduziert. Die Anregungsamplitude bleibt immer bei 100 %. Die Laserausgangsleistung wird dabei durch das Ändern des Verhältnisses Pulsdauer zu Pausenlänge variiert.



Links: Ramp-Betrieb beim Laserschweißen
 Rechts: Ramp-Betrieb beim Einstechen

Fig. 25242

Wie schnell die Ausgangsleistung gesteigert und über welchen Zeitraum sie wieder reduziert wird, kann in so genannten Ramp-Zyklen programmiert werden.

Der Ramp-Betrieb ist eine wichtige Funktion der TASC 3 Lasersteuerung und wird vor allem beim Schweißen und Schneiden für den Einstechzyklus benutzt. Die Laserleistung wird zu Beginn des Prozesses langsam gesteigert. Ist das Startloch erzeugt, wird der Ramp-Zyklus beendet.

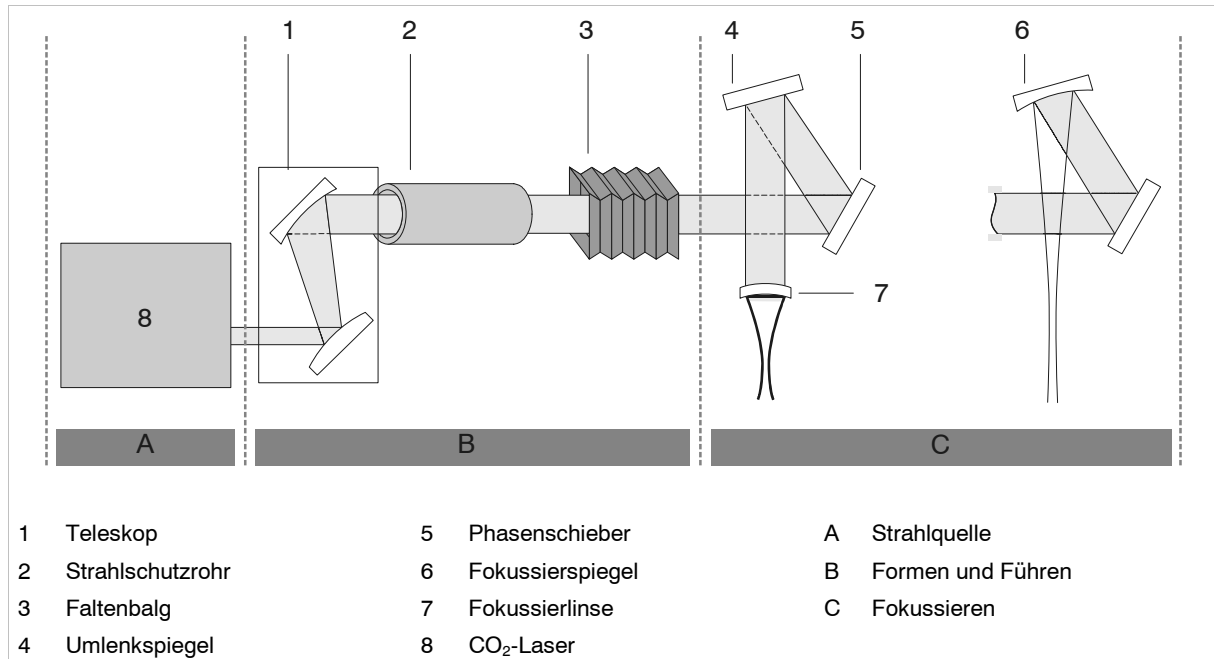
Kapitel 3

Den Strahl formen und führen

| | | |
|-----|----------------------------------|------|
| 1. | Komponenten | 3-2 |
| 2. | Spiegel..... | 3-3 |
| 3. | Strahlteleskop | 3-5 |
| 3.1 | Adaptive Spiegel | 3-7 |
| 3.2 | Verfahrbarer Spiegelträger | 3-8 |
| 3.3 | Fokuslagenverschiebung | 3-8 |
| 4. | Mehrstationenbetrieb..... | 3-9 |
| 4.1 | Strahlteiler | 3-9 |
| 4.2 | Strahlweichen..... | 3-10 |

1. Komponenten

Zwischen Strahlquelle und Werkstück wird der Laserstrahl des CO₂-Lasers meist aufgeweitet, läuft als freier Strahl dann in Rohren oder Faltenbälgen und wird schließlich mit Spiegeln oder Lin-
sen fokussiert.



Weg des Laserstrahls von der Strahlquelle zum Werkstück

Fig. 48004

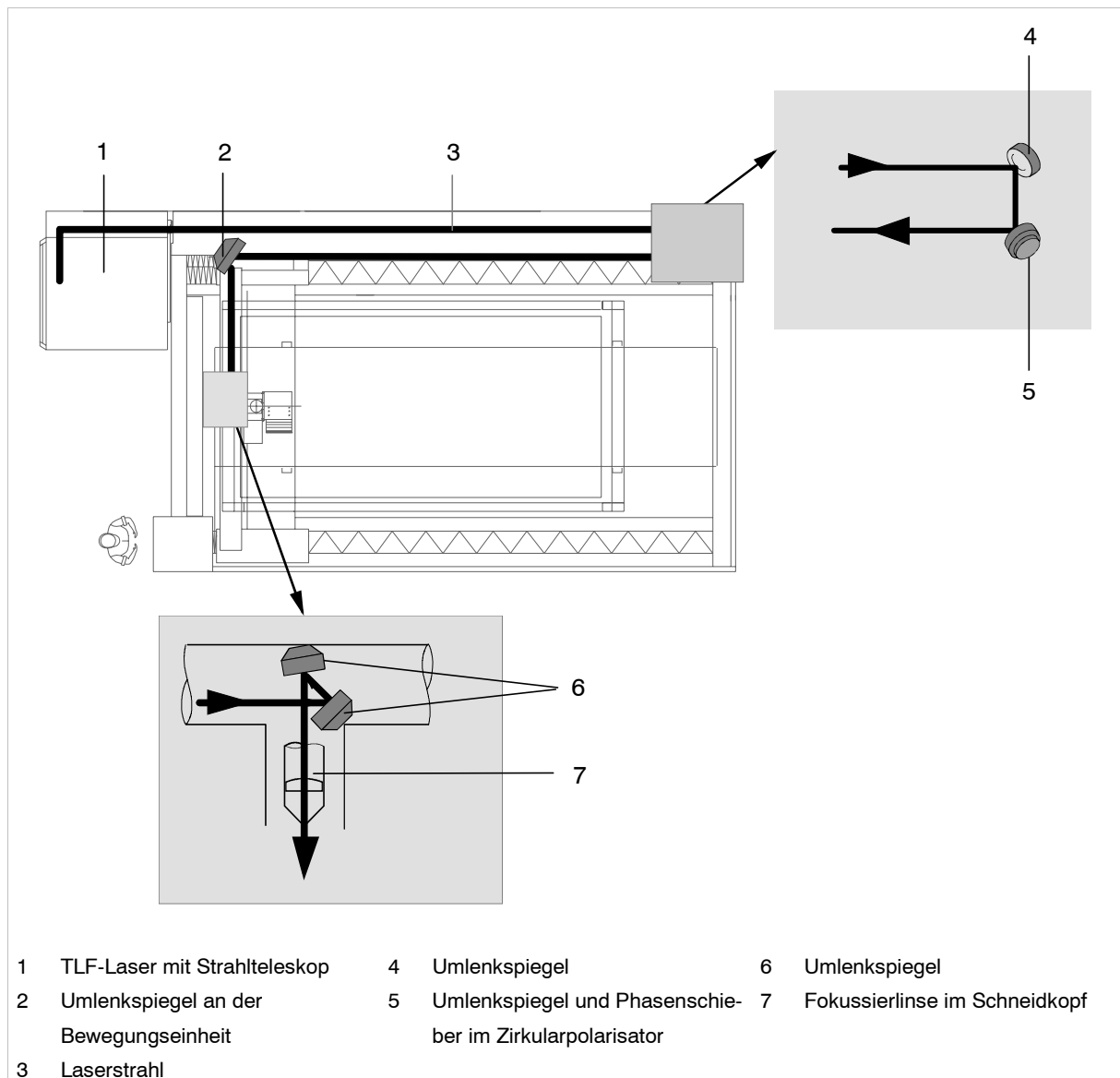
Welche Komponenten und Materialien eingesetzt werden, bestimmt die Wellenlänge des Laserstrahls. Quarzglas kann nicht eingesetzt werden, da es zu 100 % das CO₂-Laserlicht absorbiert. In Glasfasern lässt sich deshalb das Licht des Festkörperlaser führen, das des CO₂-Lasers hingegen nicht.

2. Spiegel

Der Laserstrahl wird über Spiegel in starren Strahlschutzrohren zur Bearbeitungsstation hin geführt.

Thermal Blooming

In den Rohren und Faltenbälgen ist ein Medium enthalten, das den Laserstrahl weder absorbiert, streut oder deformiert. In der Regel werden Stickstoff oder gereinigte Luft eingesetzt. Verunreinigungen im Gas absorbieren das Laserlicht und führen zum so genannten Thermal Blooming. Das Gas wird erwärmt und es bildet sich eine thermische Gaslinse im Strahlweg. Die Folge ist eine Aufweitung des Laserstrahls und damit verbunden eine Divergenz- und Fokuslagenänderung.



Strahlführung am Beispiel der TruLaser 3030

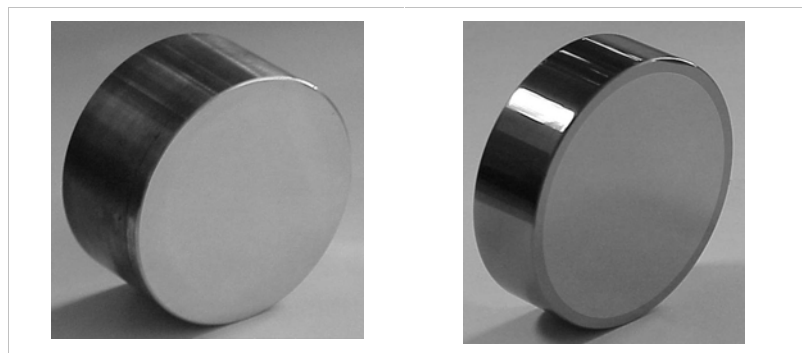
Fig. 25236

Kupferspiegel Kupferspiegel besitzen ein hohes Reflexionsvermögen und eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Nachteilig ist die große Wärmeausdehnung.

Siliziumspiegel Siliziumspiegel haben im Vergleich zu Kupferspiegel ein geringeres Reflexionsvermögen und eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Sie zeichnen sich aber durch eine wesentlich geringere Wärmeausdehnung aus, die wiederum eine geringere thermische Verformung des Spiegels zur Folge hat.

Um eine Erwärmung und dadurch letztendlich eine Zerstörung der Spiegel zu vermeiden, dürfen auch die Spiegel möglichst wenig Strahlung absorbieren. Unbeschichtete Cu-Spiegel absorbieren 0,6-1,1 % der Strahlung. Der Einsatz dielektrischer Schichten auf Cu-Spiegeln z. B. macht es möglich, Absorptionen auf bis zu 0,1% (MMR-Umlenker) zu minimieren. Dabei werden auf die Spiegel zunächst eine hochreflektierende und anschließend eine antireflektierende Schicht aufgebracht.

Auch verschmutzte Spiegeloberflächen absorbieren Laserlicht. Dadurch erwärmt sich der Spiegel und verformt sich. Auch hier ist die Folge eine Änderung der Strahlausbreitungsrichtung und damit eine Fokuslagenverschiebung.



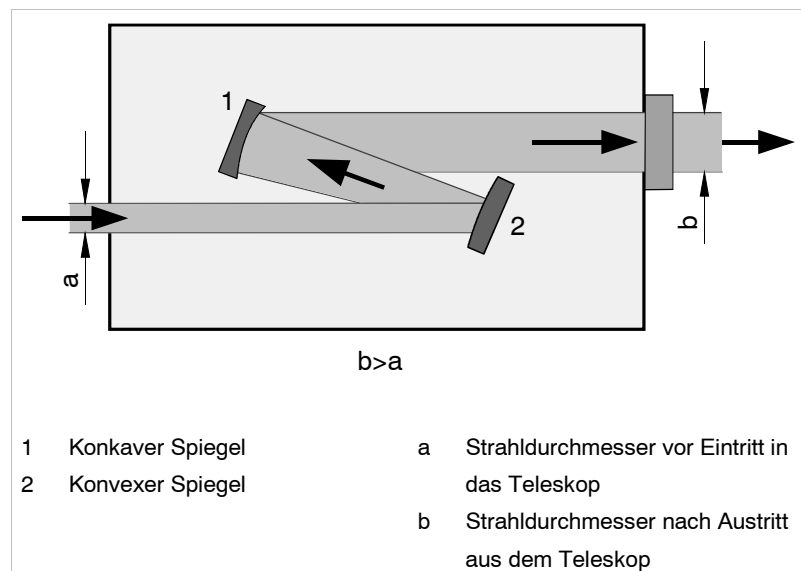
Externe Umlenkspiegel: links aus Kupfer, rechts aus Silizium Fig. 25244, 25245

Multilayer So genannte Multilayer bestehen aus mehreren Schichten und wirken wie Phasenschieber. Sie haben einen Absorptionsgrad von 2 % und sind sehr empfindlich.

3. Strahlteleskop

Strahlteleskope werden in Maschinen mit bewegter Optik eingesetzt, um den Laserstrahl über große Entfernungen nahezu parallel zu transportieren. Zudem wird die Spitzenintensität des Laserstrahls auf die Strahlführungskomponenten reduziert, was zur Folge hat, dass diese weniger erwärmt werden und sich die Fokusslage nicht zu stark verschiebt.

Der Laserstrahl durchläuft das Strahlteleskop direkt nach dem Austritt aus der Strahlquelle. Im Teleskop sind zwei Spiegel, ein konvexer und ein konkaver (Fig. 24223) angebracht. Der konvexe Spiegel weitet den Laserstrahl auf ein definiertes Maß auf. Der konkave Spiegel richtet ihn wieder parallel aus. Gebräuchlich sind Teleskope, die den Strahldurchmesser um den Faktor 1.5 bis 2.0 vergrößern.



Schematisch: Strahlaufweitung im Strahlteleskop

Fig. 24223

Eingesetzt wird das Strahlteleskop bei Laserleistungen bis 3,2 kW.

Externes Strahlteleskop

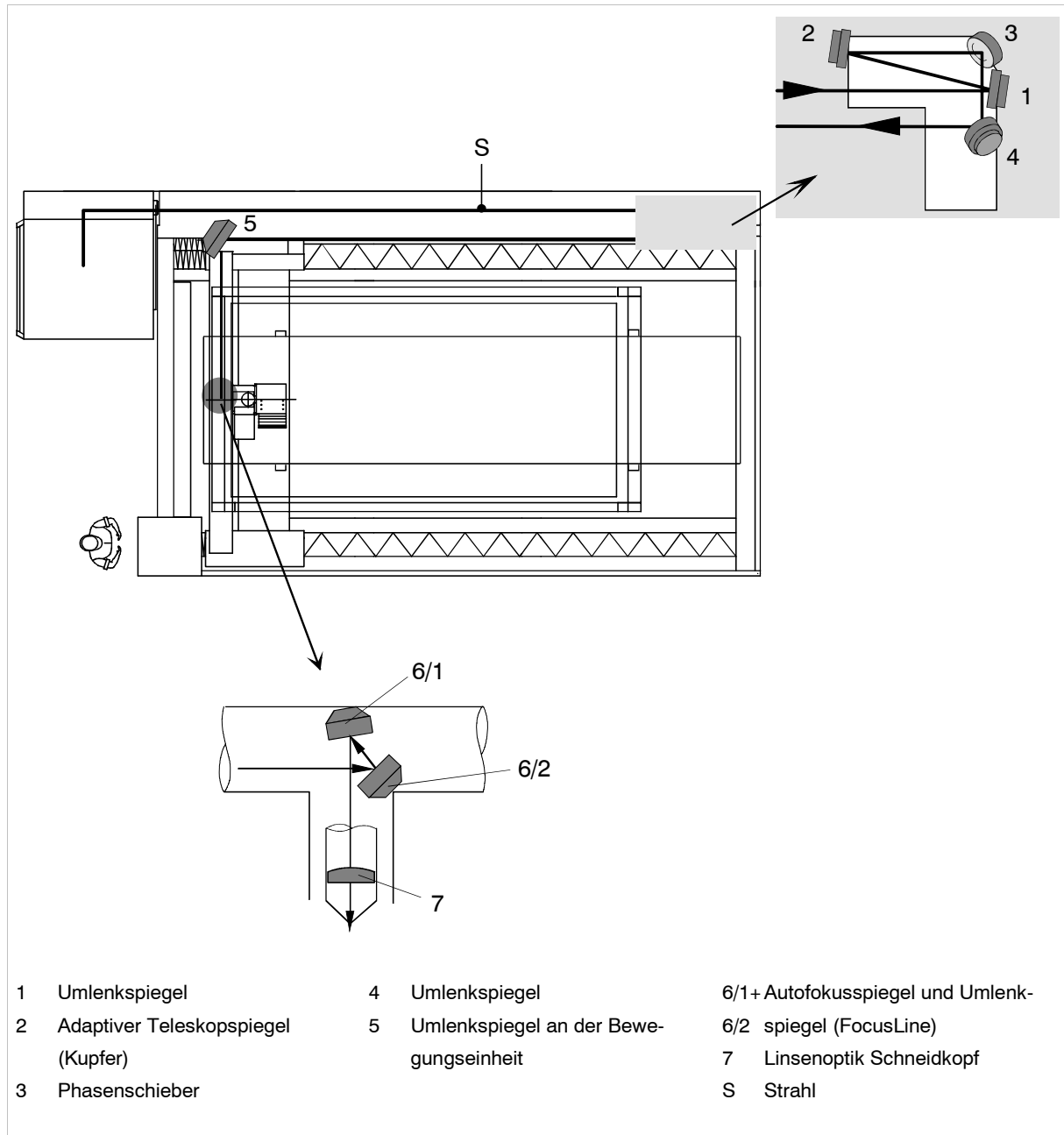
Das externe Strahlteleskop wird hauptsächlich bei 4 kW Lasern eingesetzt. Durch die höhere Leistung werden andere Anforderungen an den Aufbau des Teleskops gestellt, um eine hohe Strahlqualität zu gewährleisten.

Der Laserstrahl verlässt den Laser und tritt erst an der Maschine in das Teleskop ein. Zunächst passiert er einen adaptiven Spiegel, der den Strahl aufweitet. Anschließend wird er über Umlenkspiegel auf den Autofokusspiegel der Bewegungseinheit umgelenkt.

Mit dem Autofokusspiegel wird der Divergenzwinkel des Laserstrahls so verändert, dass eine systematische Verlagerung des Fokus nach oben oder unten ermöglicht wird.

Funktionen des Spiegels:

- Automatische Anpassung der Fokuslage an Materialart und Materialdicke.
- Kompensieren der Fokuslagenveränderungen durch unterschiedliche Strahllängen über den Arbeitsbereich.

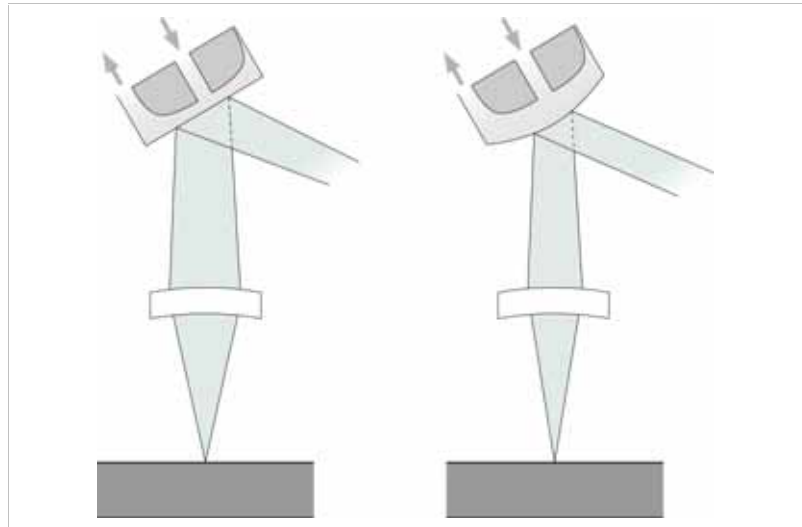


Strahlführung der TruLaser 3030/3040/3060 mit TruFlow 4000

Fig. 19061

3.1 Adaptive Spiegel

Adaptive Spiegel werden eingesetzt, um die Divergenz des Laserstrahls gezielt zu verändern und dadurch die Fokusslage zu steuern. Ihre Wölbung lässt sich durch den Druck des Kühlwassers hinter der Spiegelfläche verändern.



Wasserdruck wölbt den adaptiven Spiegel nach außen

Fig. 48007

Steigt der Druck des Kühlwassers, wölbt sich der Spiegel nach außen. Die Unterschiede liegen im Mikrometerbereich. Dies genügt jedoch, um die Divergenz des Laserstrahls so zu ändern, dass sich die Fokusslage am Werkstück um bis zu 12 mm verschiebt. Dadurch lässt sich sowohl die Verschiebung der Fokusslage ausgleichen als auch die Fokusslage an verschiedene Materialdicken anpassen.

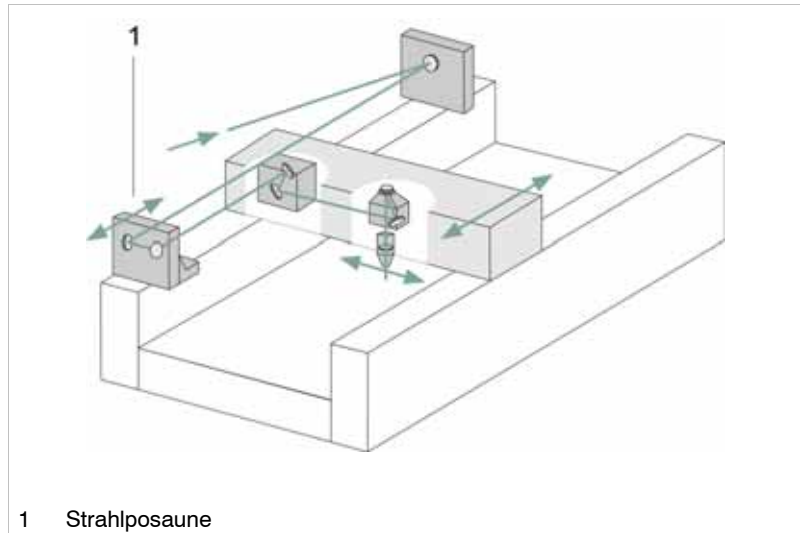
Eingesetzt werden adaptive Spiegel an verschiedenen Stellen der Strahlführung:

- Im Strahlteleskop, um den Fokussdurchmesser konstant zu halten.
- Als erster Spiegel, um den Strahldurchmesser einzustellen.
- Als letzter Umlenkspiegel vor der Bearbeitungsoptik, um die Fokusslage anzupassen.

3.2 Verfahrbarer Spiegelträger

Der verfahrbare Spiegelträger sorgt für gleichmäßige Strahleigenschaften über den gesamten Arbeitsbereich der Maschine.

Zwei Umlenkspiegel, die je nach Position des Schneidkopfes im Arbeitsbereich verfahren werden, sorgen dafür, dass der Strahlweg immer annähernd gleich lang ist.



Strahlweg in einer Flachbett-Laserschneidanlage

Fig. 48008

Eingesetzt wird der verfahrbare Spiegelträger in der Regel bei 5 und 6 kW Lasern.

3.3 Fokuslagenverschiebung

Divergenzänderung

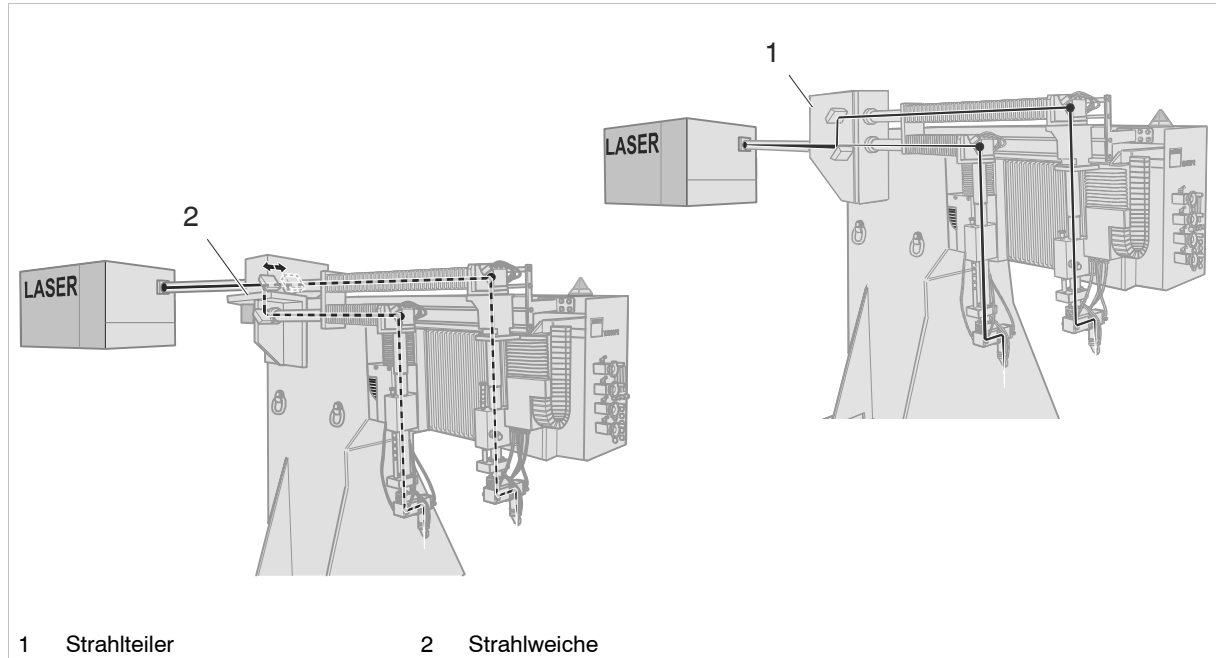
Für die Fokuslagenverschiebung ist eine Divergenzänderung verantwortlich. Für diese wiederum gibt es 2 Ursachen:

- Die Entfernung zwischen Strahltaile und Optik verändert sich. Dies ist bei Laserschneidanlagen mit fliegender Optik der Fall.
- Optische Komponenten wie Auskoppel- oder Umlenkspiegel erwärmen sich und weiten deshalb den Laserstrahl zusätzlich auf.

Abhilfe schaffen adaptive Spiegel und der verfahrbare Spiegelträger.

4. Mehrstationenbetrieb

Mit Hilfe von Strahlteilern kann der Laserstrahl geteilt und dadurch an zwei oder mehrere Arbeitsstationen gleichzeitig geführt werden.



Strahlgang TruLaser Cell 1100 in P2-Version

Fig. 47182

4.1 Strahlteiler

Strahlteiler sind Umlenkspiegel, die entweder über eine Linearführung in den Strahl eingefahren werden und den Strahl ganz oder teilweise (je nach Position) in einem 90-Grad-Winkel reflektieren (Reflexion). Oder sie haben eine reflektierende Beschichtung, die den Strahl teilt. In diesen teildurchlässigen Spiegeln durchläuft ein Teil des Laserlichts den Spiegel geradlinig (Transmission), der andere Teil wird wiederum im 90-Grad-Winkel reflektiert. Die Aufteilung des Strahls wird hier durch den Transmissionsgrad des Spiegels definiert.

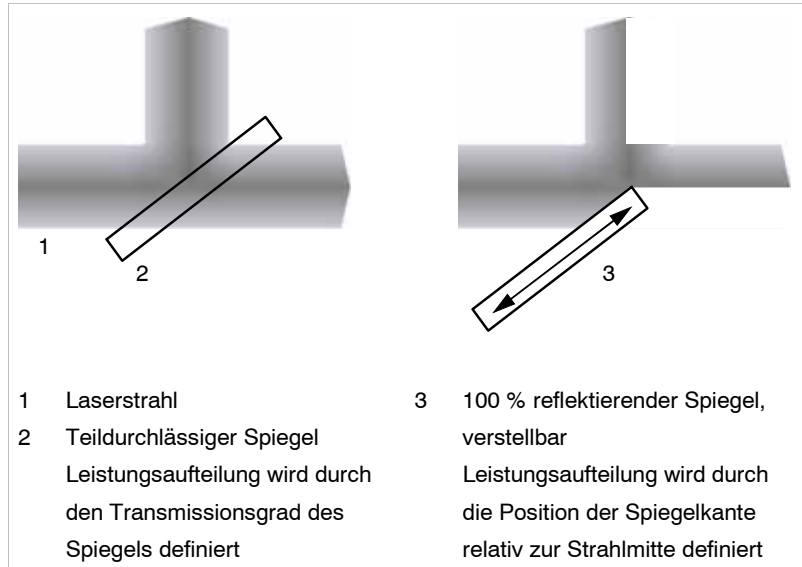


Fig. 47282

Die gaußförmige Intensitätsverteilung mit der maximalen Intensität im Zentrum des Strahls bleibt nach der Strahlteilung erhalten. Bei der transmissiven Strahlteilung wird jedoch die Intensität, also die Leistung des Laserstrahls pro cm^2 entsprechend dem Teilungsverhältnis reduziert.

4.2 Strahlweichen

Strahlweichen enthalten einen beweglichen Spiegel, der den Laserstrahl vollständig umlenkt. Abhängig von der Position des Umlenkspiegels wird der Laserstrahl auf die verschiedenen Stationen gelenkt.

Wenn die Strahlweiche inaktiv ist, befindet sich der Spiegel außerhalb des Strahlweges. Wird die Weiche aktiviert, schwenkt der Spiegel in den Strahlweg und lenkt den Laserstrahl in den entsprechenden Strahlgang vollständig um.

Kapitel 4

Komponenten zur Fokussierung

| | | |
|-----------|--|------------|
| 1. | Grundlagen | 4-2 |
| 2. | Bearbeitungsoptiken | 4-6 |
| 2.1 | Linsenoptiken | 4-7 |
| 2.2 | Spiegeloptiken..... | 4-8 |
| 2.3 | Scanneroptiken | 4-10 |
| 2.4 | Überwachungssensorik..... | 4-12 |
| | Linsen-Überwachungssensorik..... | 4-12 |
| | Überwachungssensorik des Auskoppelspiegels (OMS)..... | 4-12 |
| 2.5 | Polarisation | 4-13 |

1. Grundlagen

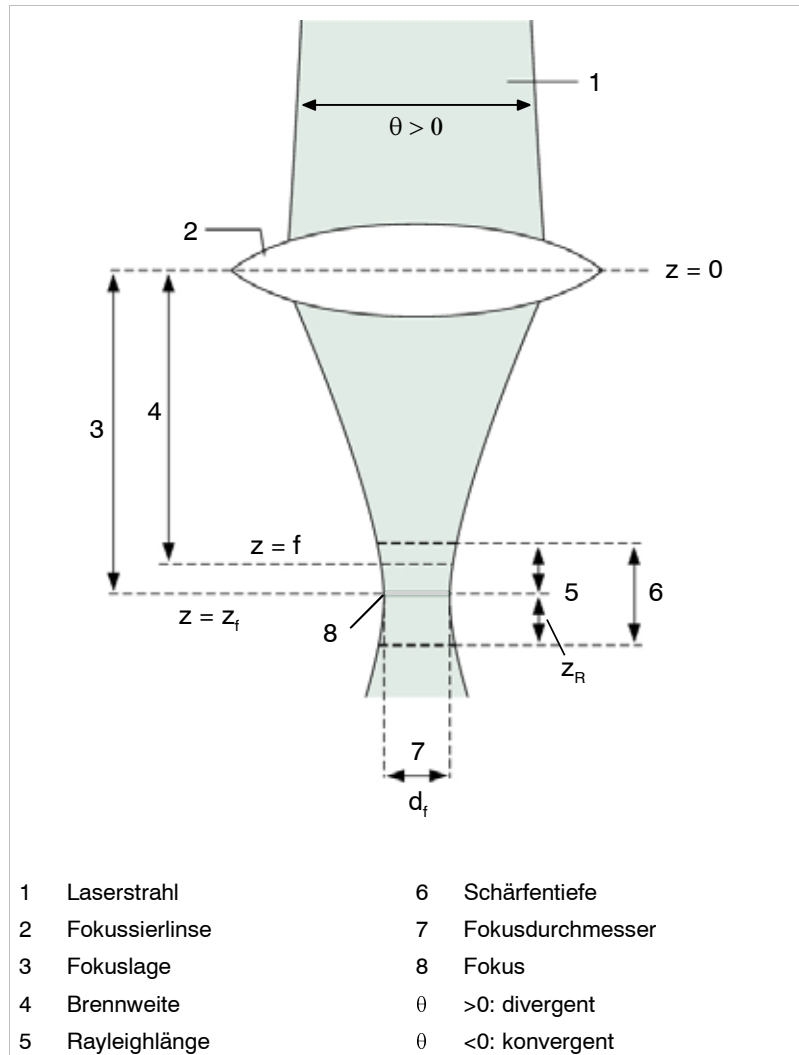
Am Ende des Strahlweges gelangt der Laserstrahl in die Bearbeitungsoptik. Dort werden die Eigenschaften des Laserstrahls wie Fokusbereich, Schärfentiefe, Bildweite und Leistungsdichte an die unterschiedlichen Verfahren der Bearbeitung angepasst. Das Material kann nun bearbeitet werden.

Da es in der Materialbearbeitung viele Verfahren gibt, werden verschiedene Bearbeitungsoptiken eingesetzt. Sie alle nutzen Spiegel oder Linsen, um den Laserstrahl zu fokussieren. Wie sie im Detail aufgebaut sind, hängt davon ab, für welches Verfahren und an welcher Maschine sie eingesetzt werden.

Physikalische Grundlagen

Beim Fokussieren wird der Laserstrahl gebündelt. Die Stelle mit dem kleinsten Strahldurchmesser ist der Fokus, häufig auch Brennfleck genannt. Hier erhöht sich die Leistungsdichte um einige Zehnerpotenzen, sie reicht nun aus, Material zu bearbeiten.

Spiegel oder Linsen fokussieren den Laserstrahl, indem sie ihn durch Reflexion oder Brechung ablenken und bündeln.



Prinzip des Fokussierens

Fig. 47279



Kenngößen Fokusbereich

Je kleiner der Fokusbereich ist - je stärker also der Strahl fokussiert wird - desto höher ist die Leistungsdichte im Fokus und desto feiner lässt sich das Material bearbeiten. Außerdem wird eine hohe Prozessgeschwindigkeit erreicht.

Rayleighlänge

Nach dem Fokus weitet sich der Strahl wieder auf. Die Rayleighlänge gibt an, in welchem Abstand zum Fokus sich die Spitzenintensität im Strahl halbiert oder die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt hat.

$$I_{ZR} = I_{ZF}/2 \rightarrow r_{ZR} = \sqrt{2} \cdot r_F$$

| | | | |
|----------|---------------------------------|-------|-----------------------|
| r_{ZR} | Strahlradius in einer Rayleigh- | r_F | Strahlradius im Fokus |
| | länge Abstand vom Fokus | | |

Je größer die Rayleighlänge, desto geringer ist die Aufweitung. Die doppelte Rayleighlänge wird häufig als Schärfentiefe bezeichnet. Große Rayleighlängen werden z. B. zum Schneiden dicker Bleche benötigt.

Bildweite

Die Bildweite gibt den Abstand zwischen Linsenmitte und Fokus an. Sie entspricht näherungsweise der Brennweite. Je größer die Bildweite ist, desto größer ist der Abstand zwischen Linse und Werkstück, der so genannte Arbeitsabstand.

Große Arbeitsabstände werden vor allem beim Schweißen mit Scanneroptiken benötigt.

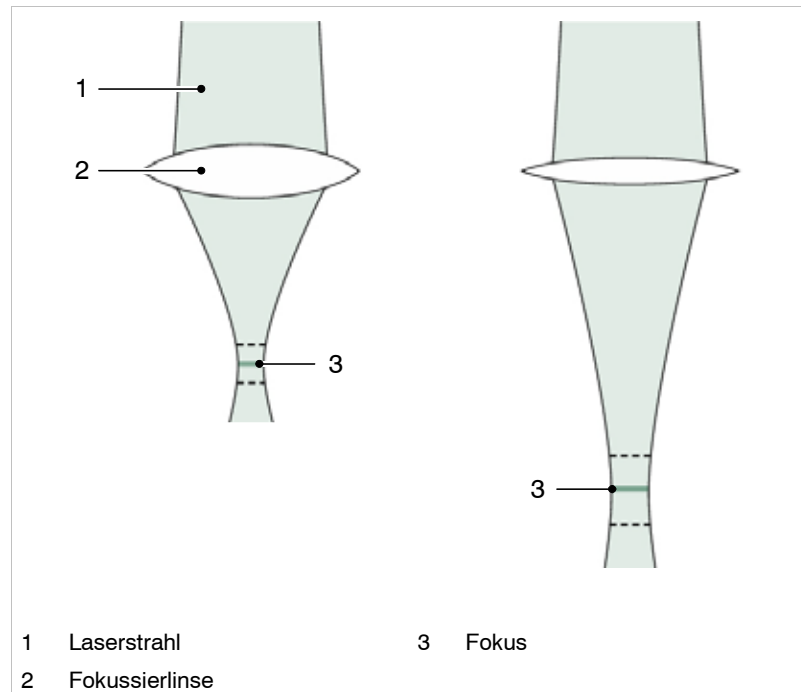
Vorteile größerer Arbeitsabstände:

- Minimale Verschmutzung der Optik.
- Verbesserte Schärfentiefe.
- Bessere Zugänglichkeit.

Viele Einflussgrößen bestimmen, welche Werte die Kenngößen annehmen:

Brennweite

Die Brennweite der Linse oder des Fokussierspiegels gibt den Abstand zwischen der Linsenmitte oder dem Spiegel und dem Brennpunkt eines idealen Parallelstrahls an. Je kleiner die Brennweite ist, desto stärker wird der Strahl fokussiert und desto kleiner sind Fokusbereich, Rayleighlänge und Bildweite.

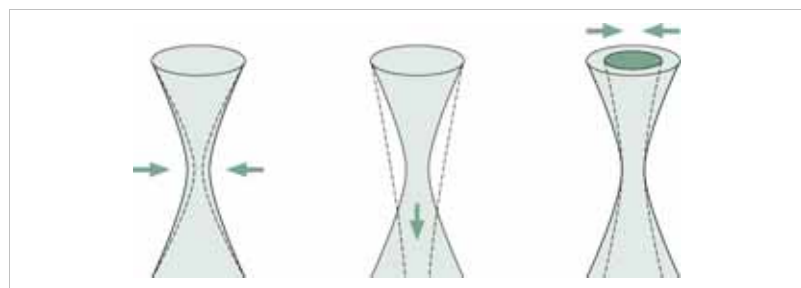


Kleinere Brennweite (links)

Fig. 47280

Strahlqualität

Die Strahlqualität beeinflusst den kleinsten möglichen Fokusbereich und die Rayleighlänge. Je höher die Strahlqualität ist, desto kleinere Fokusbereiche lassen sich erzeugen. Bei gleichem Fokusbereich ist außerdem die Rayleighlänge größer.



Größere Arbeitsabstände und kleinere Strahldurchmesser auf der Linse durch höhere Strahlqualität

Fig. 47281

Divergenz

Die Divergenz (Öffnungswinkel) des Laserstrahls wirkt sich auf die Bildweite aus. Bei positiven Öffnungswinkeln vergrößert sich die Bildweite gegenüber der Brennweite. Bei negativem Öffnungswinkel (Konvergenz) ist die Bildweite kleiner als die Brennweite.

Strahldurchmesser

Der Durchmesser des Strahls auf der Linse beeinflusst den Fokusbereich. Je größer er ist, desto kleiner wird der Fokusbereich.

2. Bearbeitungsoptiken

In der Bearbeitungsoptik wird der Laserstrahl mit Linsen oder Spiegeln fokussiert. Sie hat jedoch noch weitere Aufgaben:

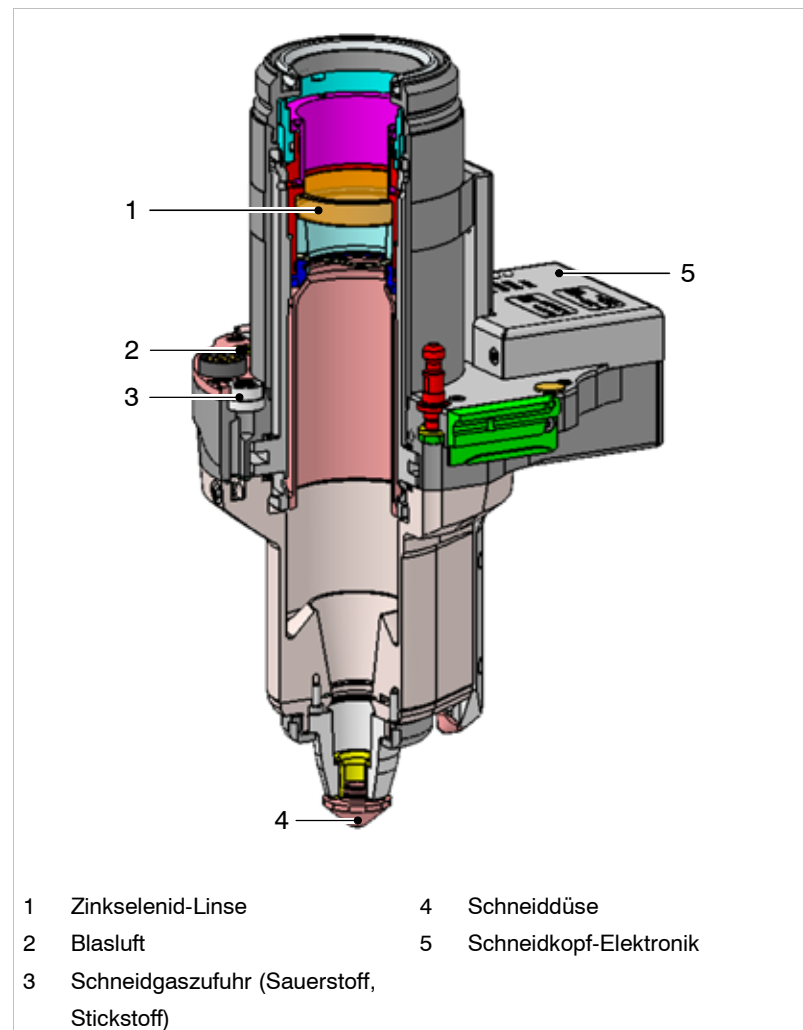
- Das Zuführen von Zusatzstoffen, die für das Verfahren benötigt werden, z. B. Gas zum Schneiden oder Schweißen, oder Zusatzwerkstoffe zum Schweißen.
- Für die Prozesskontrolle sind Sensoren eingebaut, z. B. die Abstandregelung beim Laserschneiden oder die Prozessbeobachtung beim Laserschweißen.
- Schnittstellen zur Maschine und zur Maschinensteuerung sind enthalten, z. B. Energie- und Kühlwasseranschlüsse sowie Datenschnittstellen.
- Schutzvorrichtungen, die Schmutz und Staub von den empfindlichen Linsen oder Spiegeln fernhalten, z. B. Schutzgläser oder Crossjets - Luftströme, die Spritzer ablenken.
- Hilfen beim Einrichten des Bearbeitungsprozesses, wie Leistungsmesser und ein Pilotlicht können enthalten sein.

2.1 Linsenoptiken

Linsen müssen für die Wellenlänge des jeweiligen Laserstrahls transparent sein. Andernfalls würden die Linsen Laserlicht absorbieren und sich erwärmen. Die Linsen dehnen sich aus und Abbildungsfehler entstehen. Im schlimmsten Fall ist die thermische Spannung so stark, dass die Linsen zerstört werden.

Glaslinsen können bei CO₂-Lasern nicht eingesetzt werden, da sie das Laserlicht des CO₂-Laserstrahls nahezu vollständig absorbieren. Zinkselenid- oder Galliumarsenid-Linsen fokussieren das CO₂-Laserlicht hingegen gut. Sie werden allerdings nur bis zu einer Laserleistung von max. 6 kW verwendet. Erhitzen sie sich zu stark, können sie verbrennen und gesundheitsschädliche Zersetzungsprodukte freisetzen.

Über die Schneiddüse werden der Laserstrahl und das Schneidgas zur Bearbeitung auf das Werkstück gebracht. Gekühlt wird entweder direkt über das Prozessgas oder über einen Wasserkreislauf.



Beispiel eines Schneidkopfes einer Laserschneidmaschine

Fig. 48908

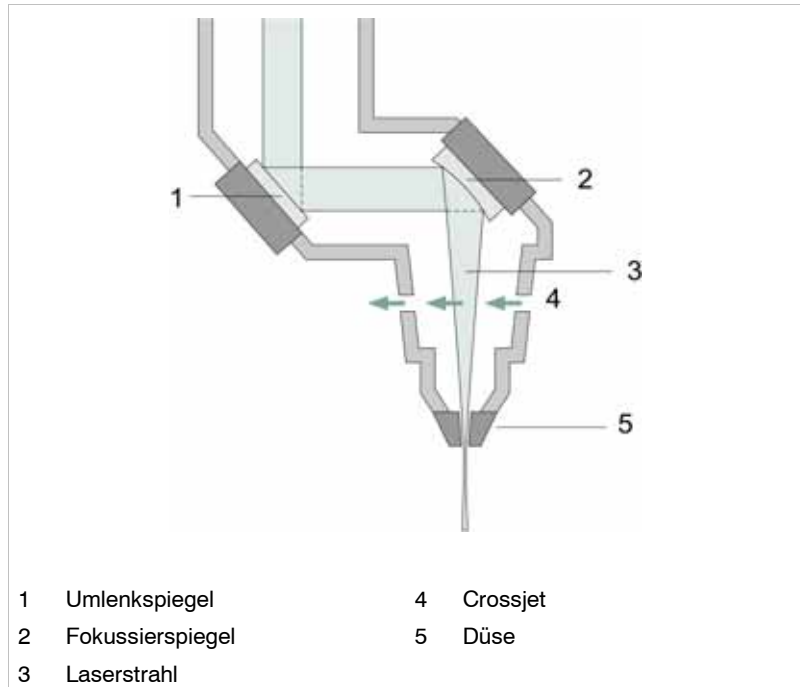
2.2 Spiegeloptiken

Bei höheren Laserleistungen werden Spiegeloptiken eingesetzt. Sie können direkt unter der Spiegeloberfläche gekühlt werden und haben eine höhere Zerstörschwelle und eine geringere Deformation. Auch kommen Zinkselenid-Linsen hier an ihre Belastungsgrenze. Deshalb werden in Spiegeloptiken Metallspiegel eingesetzt. Sie können nicht thermisch zerstört werden und sind so unempfindlicher gegenüber Verschmutzungen, die Laserlicht absorbieren.

Die Spiegel können durch konkave oder konvexe Spiegelflächen den Laserstrahl fokussieren oder aufweiten. Nach außen gewölbte (konvexe) Spiegel weiten den Strahl auf, nach innen gekrümmte (konkave) Spiegel fokussierten den Strahl. Gleichzeitig lenken Spiegel den Laserstrahl um.

In den Schweiß- und Schneidoptiken werden Parabolspiegel eingesetzt. Sie werden direkt über einen Wasserkreislauf gekühlt.

Schweißoptiken



CO₂-Spiegelschweißoptik. Der Fokussierspiegel lenkt den Laserstrahl gleichzeitig um 90 Grad um

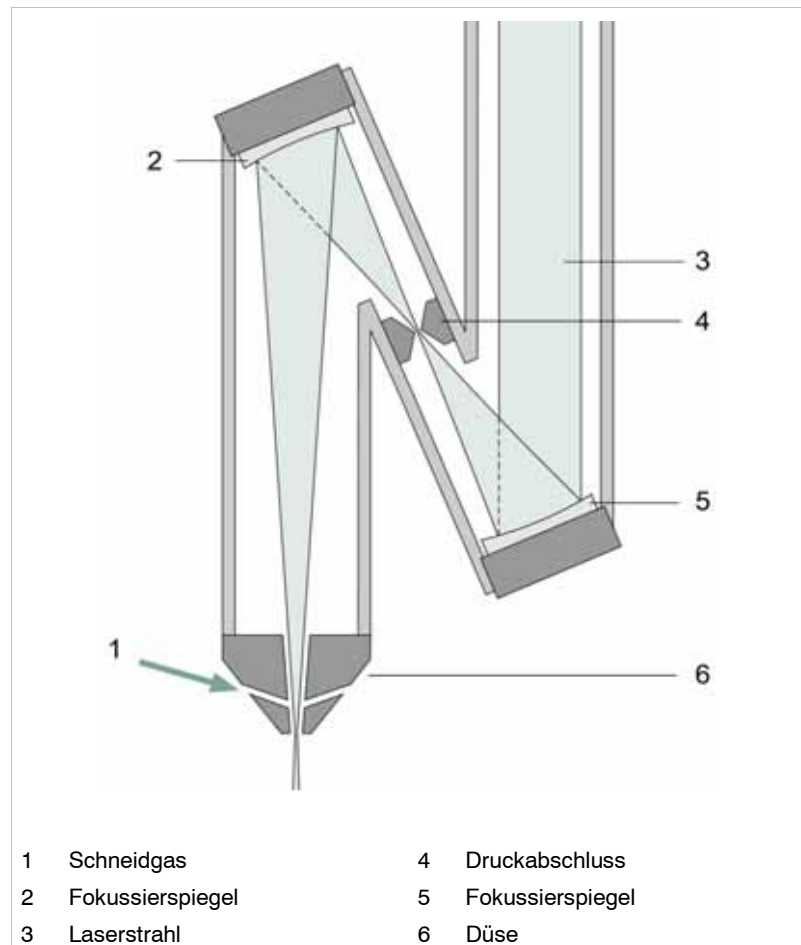
Fig. 48009

In diesen Optiken sind 2 Spiegel gegeneinander versetzt angeordnet. Der erste Spiegel ist meist eben, er lenkt den Laserstrahl so um, dass er den gewölbten Fokussierspiegel im richtigen Winkel trifft. Der Fokussierspiegel bündelt den Laserstrahl und lenkt in auf das Werkstück.

Die Spiegel bestehen aus Kupfer und werden mit Wasser gekühlt, da sie 0,5 - 2 Prozent der Laserleistung absorbieren und dadurch so heiß werden können, dass sie sich verformen. Der Crossjet, ein Gasstrom, der senkrecht zum Laserstrahl eingeblasen wird, sorgt dafür, dass während der Bearbeitung keine Spritzer auf die Spiegel gelangen.

Müssen dreidimensional Werkstücke bearbeitet werden, muss die Optik beweglich sein, damit der Laserstrahl immer senkrecht auf das Werkstück trifft. Dies ist möglich, wenn die Optik 2 Rotationsachsen besitzt: eine vor dem Umlenkspiegel, die andere zwischen Umlenk- und Fokussierspiegel.

Schneidoptiken



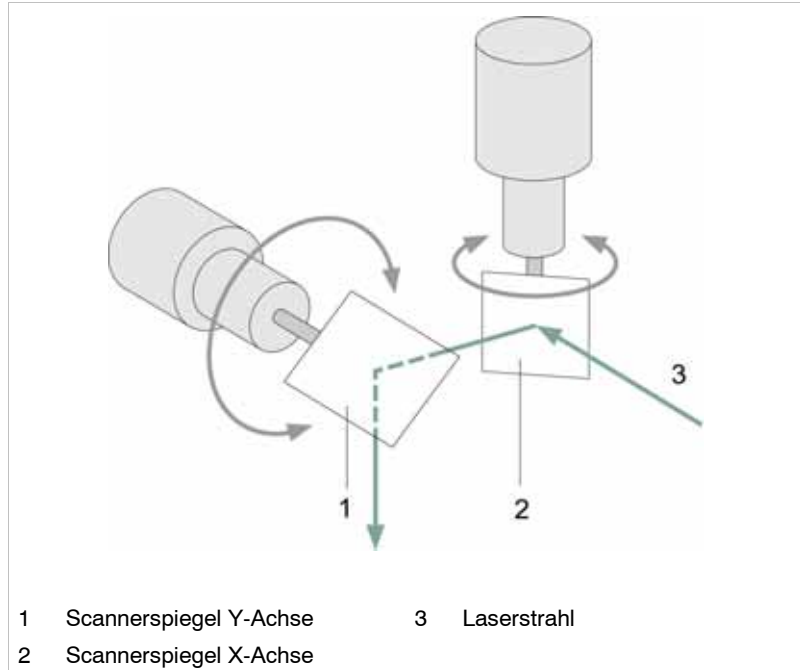
Aufbau einer CO₂-Spiegelschneidoptik für hohe Leistungen

Fig. 48010

Bei hohen Schneidleistungen von über 8 kW Laserleistung werden auch in Flachbett-Laserschneidanlagen Spiegeloptiken eingesetzt. Dies ist jedoch erst möglich geworden, nach dem zwischen den beiden Fokussierspiegeln ein Druckabschluss realisiert wurde. Er trennt die Strahlführung vom Düsenraum. Vorher war das Druckgefälle zwischen dem Schneidgasdruck in der Düsenkammer der Optik und dem Gasdruck in der Strahlführung zu groß.

2.3 Scanneroptiken

Prinzip Bei Scanneroptiken wird der Laserstrahl über 2 drehbare Spiegel geführt und anschließend mit einer Linse fokussiert. Die Drehachsen der beiden Spiegel stehen im rechten Winkel zueinander. Durch Drehen der Spiegel kann der Fokus auf jeden Punkt im Arbeitsfeld gerichtet werden.



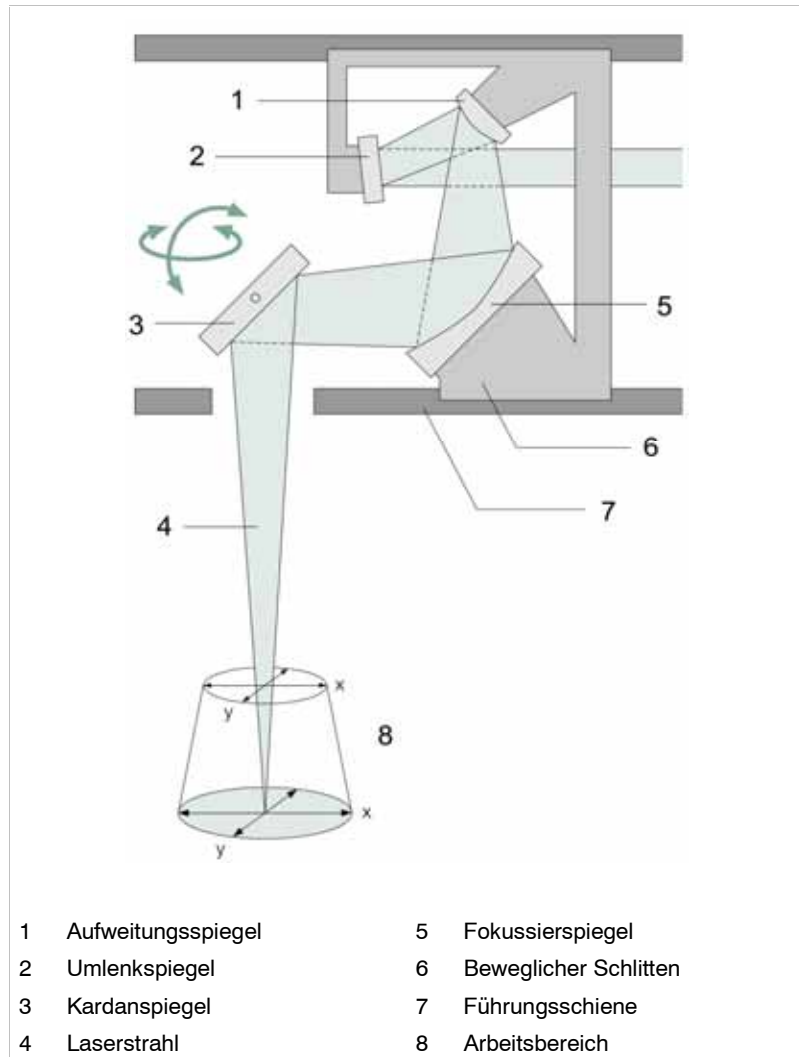
Scanneraufbau

Fig. 48011

Der Scanneraufbau hat jedoch einen Nachteil: Bezogen auf den Fokus ist das Arbeitsfeld gewölbt. Die Fokusslage im Arbeitsfeld ändert sich, ein gutes Arbeitsergebnis kann bei großen Werkstücken nicht an allen Stellen erreicht werden. Damit die Fokusslage konstant bleibt, muss der Scanneraufbau geändert werden.

Spiegel-Scanneroptik

Bei der Spiegel-Scanneroptik wird der Laserstrahl mit einem Spiegelteleskop fokussiert. Er wird dabei zunächst mit einem Umlenkspiegel auf einen gewölbten Spiegel umgelenkt. Dieser weitet den Strahl auf und trifft dann auf einen Fokussierspiegel. Alle 3 Spiegel sitzen auf einem beweglichen Schlitten, der dafür sorgt, dass der Strahlweg zwischen Fokussierspiegel und Werkstück konstant bleibt.



Spiegel-Scanneroptik mit Kardanspiegel und beweglichem Schlitten Fig. 48012

Der fokussierte Laserstrahl trifft anschließend auf einem ebenen Spiegel. Dieser Spiegel, ein so genannter Kardanspiegel, hat 2 Bewegungsachsen. Durch Drehen und Kippen lenkt er den Laserstrahl punktgenau auf das Werkstück. Dadurch, dass er den Strahl weiter auslenken kann, werden größere Arbeitsbereiche erreicht.

Bei der Laserschneidanlage TrumaScan L 4000 ist auch der Kardanspiegel auf einer Führungsschiene verfahrbar. Dadurch wird der Arbeitsbereich in X-Richtung auf 3900 mm vergrößert.

2.4 Überwachungssensorik

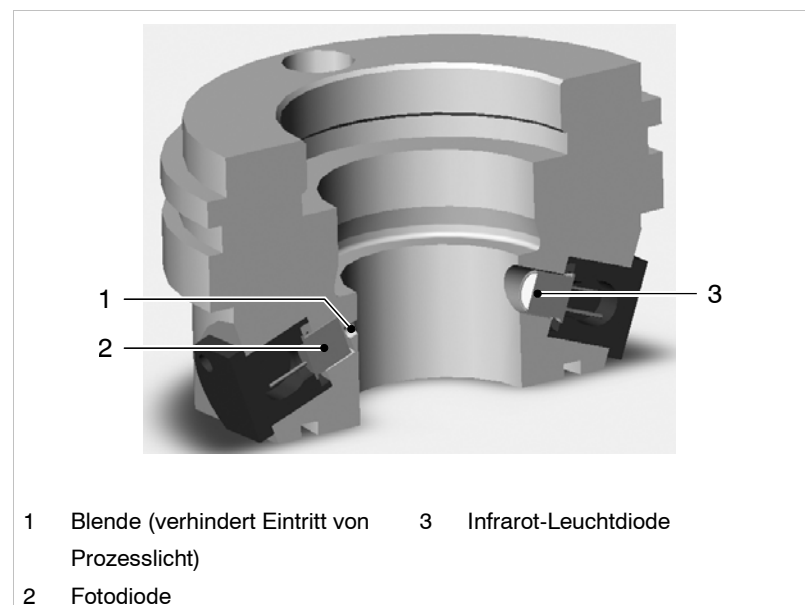
Linsen-Überwachungssensorik

Hohe Leistungsdichten stellen höchste Anforderungen an die Bauteile der Maschine, insbesondere an die Fokussierlinse. Etwaige Verschmutzungen auf der Linse führen zu einer verstärkten Absorption der Laserstrahlung. Damit verbunden ist eine Erwärmung und im ungünstigsten Fall eine thermische Zersetzung der Linse.

Die Linsen-Überwachungssensorik verhindert das vollständige Verdampfen der Fokussierlinse, indem sie bei beginnender thermischer Zersetzung der Linse den Laser innerhalb von wenigen Millisekunden abschaltet. Das blitzartige Aufleuchten der Linse, das einer beginnenden thermischen Zersetzung vorausgeht, wird über eine Photodiode erkannt, während eine integrierte Lichtschranke eine etwaige Rauchentwicklung im Bereich oberhalb der Linse wahrnimmt.

Überwachungssensorik des Auskoppelspiegels (OMS)

Auch Auskoppelspiegel werden auf Beschädigungen und Verschmutzung überwacht. Dazu sind in der Fassung eine Infrarot-Leuchtdiode und eine Fotodiode untergebracht. Die beiden Dioden sind einander gegenüber angeordnet, und bilden einen Winkel zur Spiegeloberfläche von 20°.



Anordnung der Dioden im Auskoppelspiegel

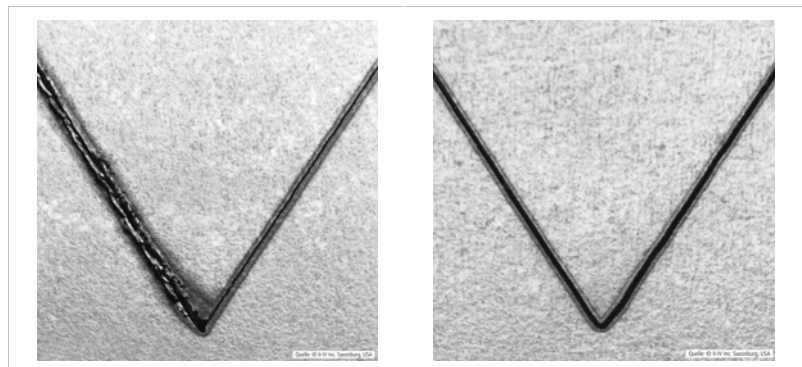
Fig. 40159

| | |
|-----------------------------------|--|
| Funktion | Die von der Infrarot-Leuchtdiode kommende Strahlung wird am Auskoppelspiegel reflektiert und trifft anschließend die Fotodiode. Diese erzeugt einen zur Strahlungsintensität proportionalen Strom, der von der Elektronik ausgewertet und in eine Signalspannung umgewandelt wird. |
| Steigen der Signalspannung | Partikel oder Fehlstellen in der Beschichtung des Auskoppelspiegels führen zu einer erhöhten Absorption von Laserstrahlung und dadurch zu Leuchterscheinungen und zu einem Anstieg der Signalspannung. Wird der langfristige Mittelwert von 2 V um 0.5 V überschritten, löst die Sensorik aus und der Laserstrahl wird abgeschaltet. |
| Sinken der Signalspannung | Ist der Auskoppelspiegel schwer beschädigt, tritt eine verminderte Reflexion der Leuchtdioden-Strahlung ein, die Signalspannung sinkt ab. Sinkt die Spannung unter 1 V, so wird der Laserstrahl abgeschaltet und kann nicht wieder eingeschaltet werden. |

2.5 Polarisation

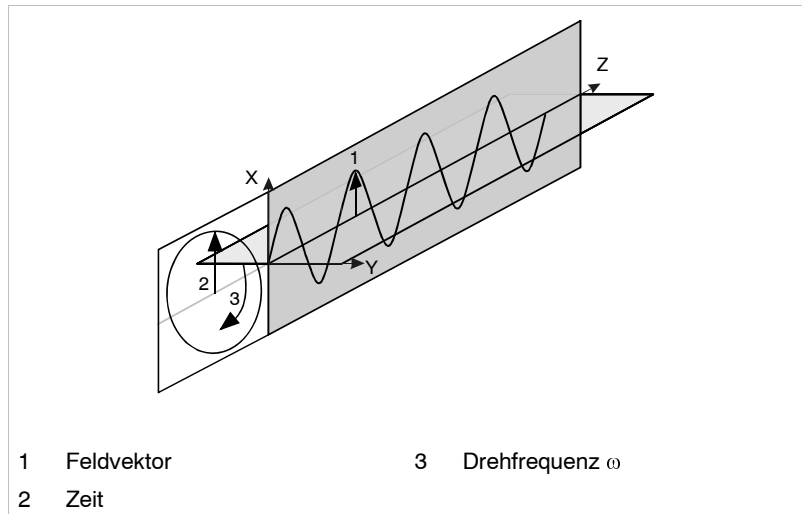
Obwohl der Laserprozess selbst keinen Einfluss auf die Polarisationsrichtung des Laserstrahls hat, wird im quadratisch gefalteten Resonator des CO₂-Lasers Licht einer einzigen Polarisationsrichtung verstärkt, so dass der austretende Laserstrahl linear polarisiert ist.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Linear polarisiertes Licht | Wird mit einem linear polarisierten Laserstrahl geschnitten, so sind die Schneidergebnisse richtungsabhängig. Stimmt die Bewegungsrichtung mit der Schwingungsrichtung überein, wird der Schnitt glatt und gratfrei. Die Schneidgeschwindigkeit kann sehr hoch sein. Schwingt das Licht jedoch quer zur Bearbeitungsrichtung, entsteht ein Grat. Beim Laserschweißen zeigen sich ähnliche Effekte, sie sind jedoch geringer ausgeprägt. Linear polarisiertes Laserlicht ist also nur für Anwendungen mit einer Bewegungsrichtung geeignet, z. B. für das Ablängen von Rohren. |
|-----------------------------------|---|



Lasergeschnittene Kante mit Polarisationssebene Fig. 061_011, 061_012 senkrecht (links) und parallel (rechts) zur Bearbeitungsrichtung

Alle Lichtwellen schwingen in eine Richtung. Die Schwingungsrichtung liegt in einer Ebene, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.



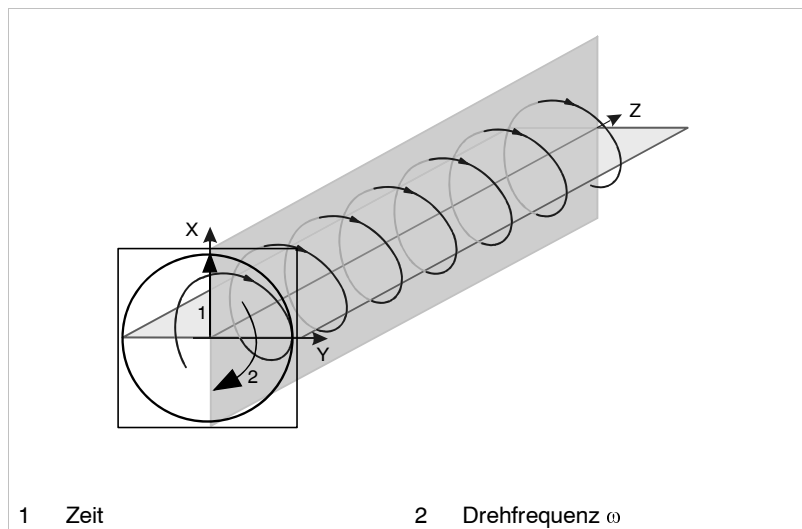
Linear polarisiertes Licht

Fig. 48206

In der Praxis ist jedoch ein in allen Richtungen gleich bleibend gutes Schneidergebnis erwünscht. Dies erreicht man mit Laserlicht, bei dem sich die Schwingungsrichtung dreht. Man spricht dann von zirkular polarisiertem Licht.

Zirkular polarisiertes Licht

Bei zirkular polarisiertem Licht rotiert der Feldvektor (siehe Fig. 48206) um die Ausbreitungsachse.

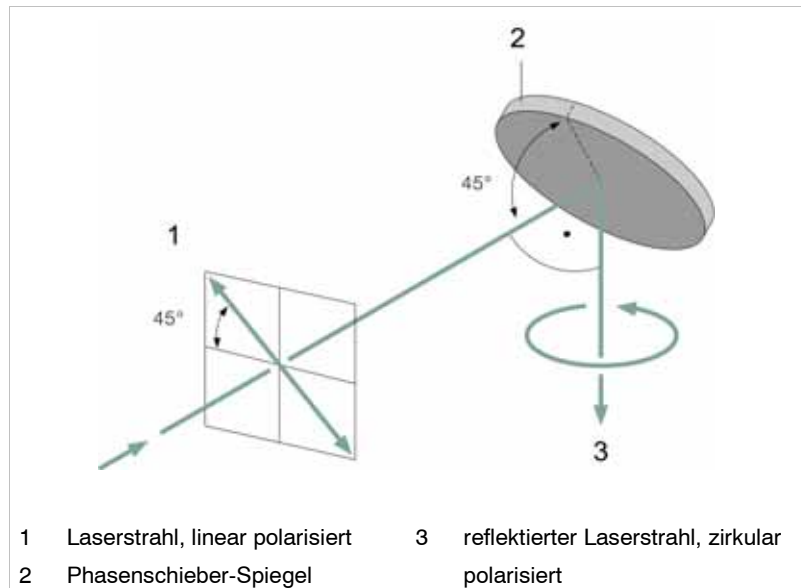


Zirkular polarisiertes Licht (elektrisches Feld)

Fig. 48204

$\lambda/4$ -Spiegel zur Phasenverschiebung

Aus linear polarisiertem Licht kann mit Hilfe eines mehrfach beschichteten Spiegels, dem so genannten $\lambda/4$ -Spiegel, zirkular polarisiertes Licht erzeugt werden.



Anordnung zur Polarisationsänderung

Fig. 48013

Der $\lambda/4$ -Spiegel hat unterschiedliche Reflexionseigenschaften für die Schwingungsanteile, die senkrecht oder waagrecht zu seiner Oberfläche stehen. Der eine Teil wird normal reflektiert, der andere Teil dringt tiefer in die Beschichtung ein. Dadurch wird er zeitverzögert reflektiert und die Wellen sind um 90° phasenverschoben. Gleichzeitig stehen die Wellen im rechten Winkel zueinander. Wenn sich nun die reflektierten Wellen überlagern, entsteht eine resultierende Welle, die zirkular polarisiert ist. Die Polarisationsänderung kann nur dann geschehen, wenn die Schwingungsrichtung des einfallenden Laserstrahls unter 45° zum $\lambda/4$ -Spiegel angeordnet ist.

Nach dem $\lambda/4$ -Spiegel soll die Polarisation erhalten bleiben. An den Umlenkspiegeln in der Strahlführung können jedoch ähnliche Effekte wie am $\lambda/4$ -Spiegel auftreten, die Polarisation kann sich etwas verändern. Die Änderung ist jedoch gering genug, so dass sie sich auf das Bearbeitungsergebnis nicht auswirkt.



Kapitel 5

Verfahren

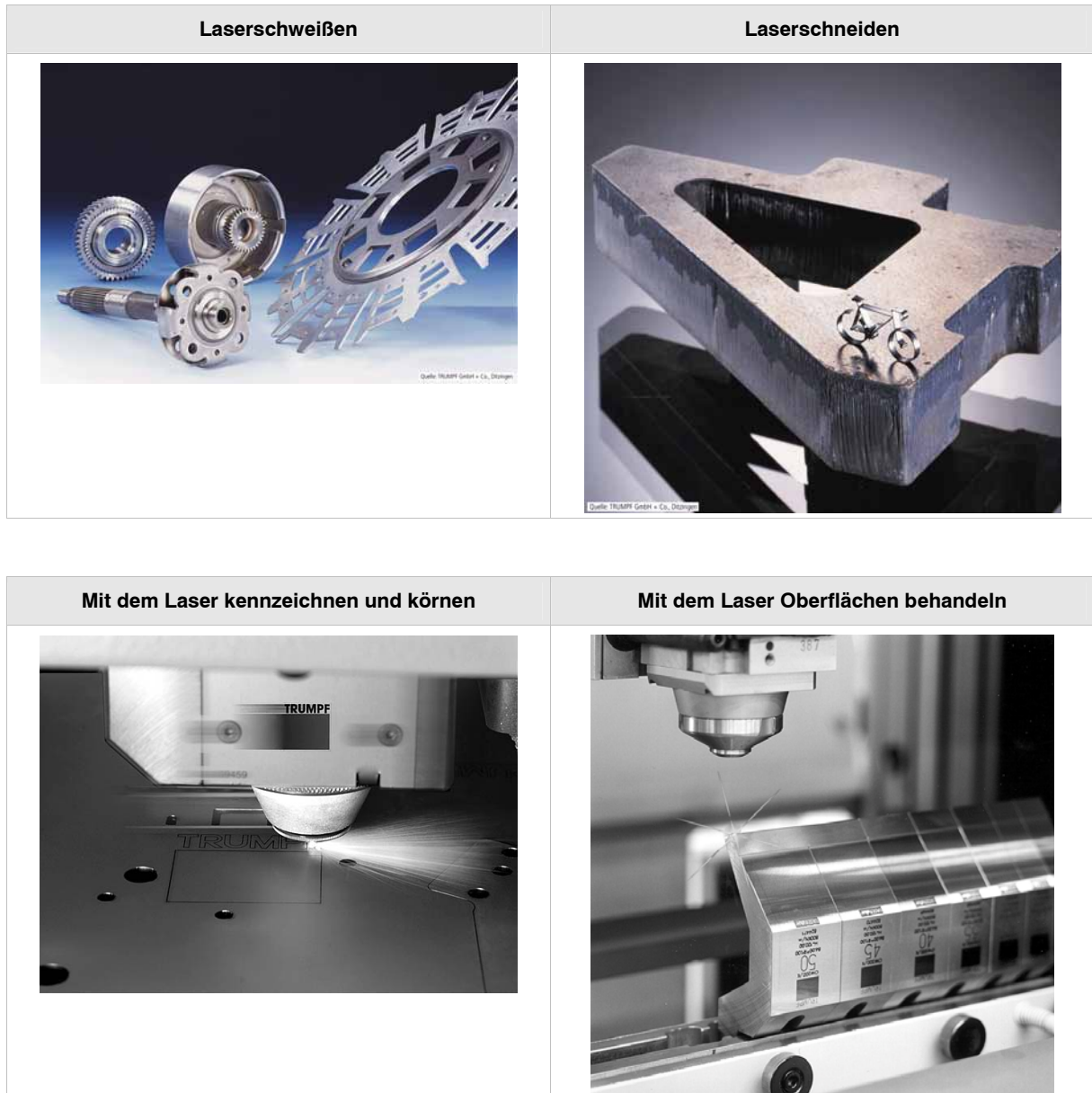
| | | |
|-----------|--|-------------|
| 1. | Einsatzgebiete der CO₂-Laser | 5-3 |
| 2. | Laserschweißen | 5-6 |
| 2.1 | Prinzip des Laserschweißens | 5-6 |
| 2.2 | Schweißverfahren | 5-8 |
| | Tiefschweißen | 5-9 |
| | Tiefschweißen mit Zusatzwerkstoffen | 5-11 |
| | Hybridverfahren | 5-11 |
| | Scannerschweißen | 5-12 |
| 2.3 | Merkmale des Verfahrens | 5-12 |
| | Nahtgeometrie und Nahtart | 5-13 |
| | Nahtvorbereitung | 5-15 |
| | Spannvorrichtungen | 5-17 |
| | Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit | 5-18 |
| | Strahlqualität und Brennweite | 5-19 |
| | Polarisation | 5-20 |
| 2.4 | Vorteile und Einsatzmöglichkeiten | 5-21 |
| 2.5 | Hochwertige Nähte erkennen | 5-24 |
| 2.6 | Maschinen und Anlagen | 5-27 |
| 3. | Laserschneiden | 5-28 |

| | | |
|-----------|--|-------------|
| 3.1 | Prinzip des Laserschneidens | 5-28 |
| 3.2 | Schneidverfahren | 5-30 |
| | Schneiden mit Sauerstoff: Brennschneiden..... | 5-30 |
| | Schneiden mit Stickstoff: Schmelzschnitten | 5-31 |
| 3.3 | Schneidkriterien | 5-33 |
| | Rautiefe..... | 5-33 |
| | Schnittspaltform und Schnittspaltbreite | 5-33 |
| | Gratfreiheit | 5-35 |
| | Material und Laserleistung..... | 5-35 |
| | Betriebsart..... | 5-35 |
| | Schneidgeschwindigkeit..... | 5-36 |
| 3.4 | Vorteile und Einsatzmöglichkeiten | 5-39 |
| 3.5 | Maschinen und Anlagen..... | 5-41 |
| 4. | Mit dem Laser kennzeichnen und körnen | 5-42 |
| 5. | Mit dem Laser Oberflächen behandeln..... | 5-43 |
| 5.1 | Laserhärten mit CO ₂ -Laser | 5-44 |
| 5.2 | Umschmelzen | 5-45 |
| 5.3 | Legieren und Dispergieren..... | 5-46 |
| 5.4 | Beschichten..... | 5-48 |
| 6. | Direct Metal Deposition (DMD) | 5-50 |

1. Einsatzgebiete der CO₂-Laser

Der Laser hat in der Industrie einen festen Platz eingenommen. Als thermisches Werkzeug kann der Laserstrahl Material

- Erwärmen (Härten oder Löten),
- Schmelzen (Schneiden oder Schweißen),
- Verdampfen oder zersetzen (Bohren oder Strukturieren).

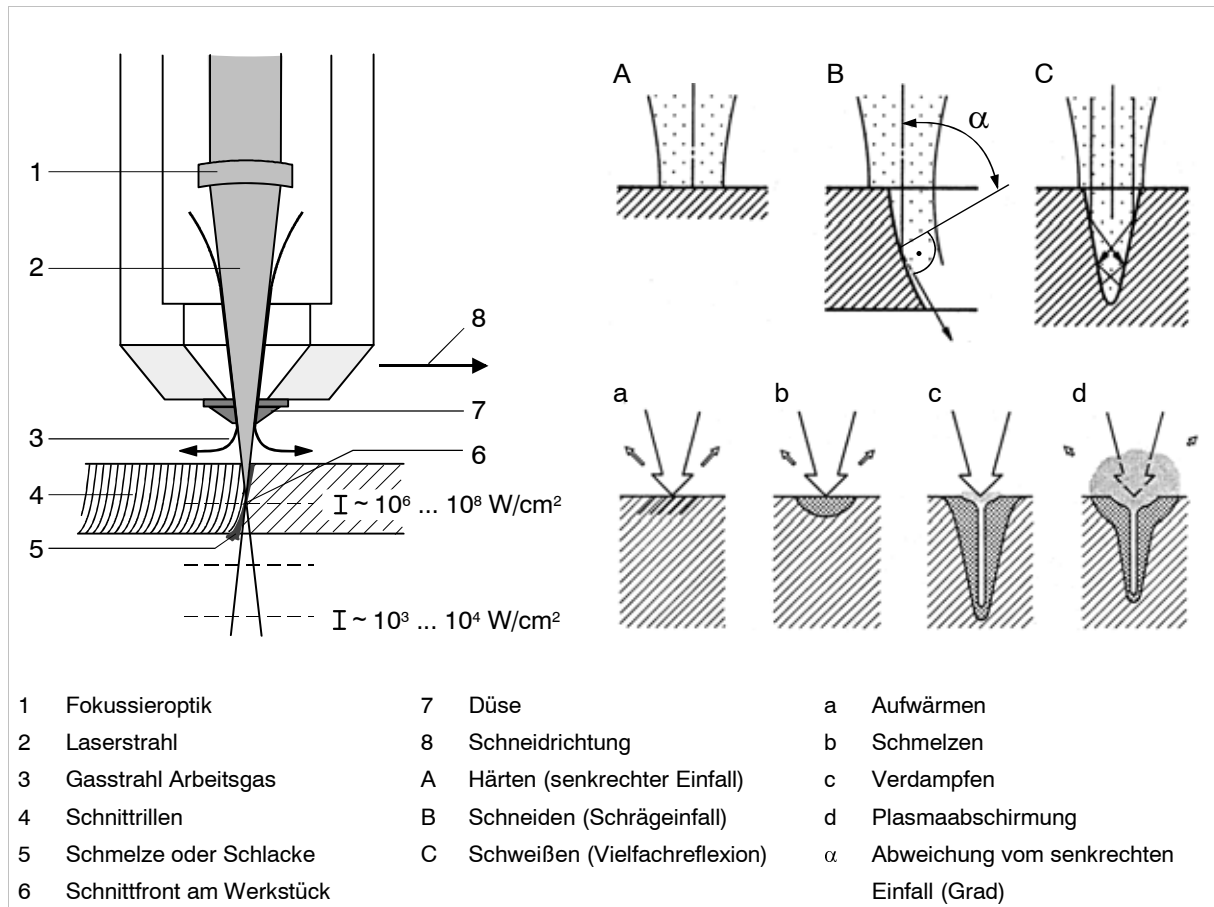


Einsatzgebiete der TruFlow-Laser

Fig. 129_034,
069_001, 24626,
24337

Leistungsdichte

Der Laserstrahl, die Strahlausbreitung und die Fokussierung müssen dabei so aufeinander abgestimmt sein, dass die Leistungsdichte optimal zum jeweiligen Prozess passt.

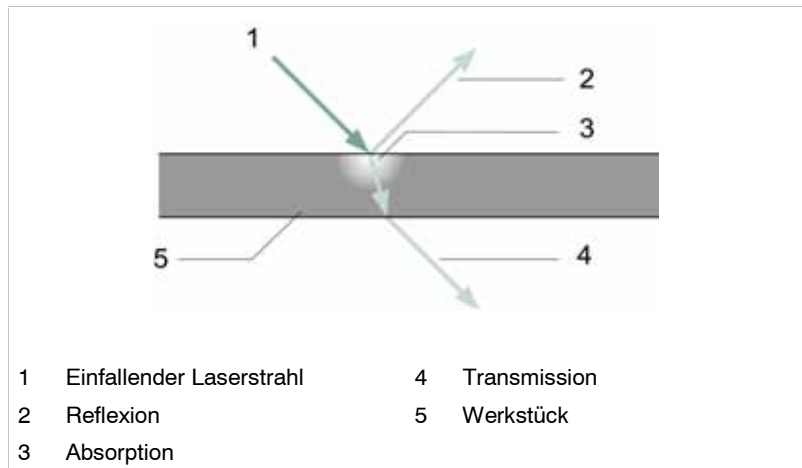


Leistungsdichten in Abhängigkeit des Abstands vom Fokus des Laserstrahls und ihre Anwendungen

Fig. 48221

Die Leistungsdichte im Fokus beträgt zwischen $10^6 - 10^8 \text{ W/cm}^2$. Mit dieser Leistungsdichte kann geschnitten, geschweißt und das Material verdampft (c) werden. Auch tritt hier die Plasmaabschirmung auf (d). Bei einer mittleren Leistungsdichte von ca. 10^5 W/cm^2 schmilzt das Material (b). Leistungsdichten von ca. $10^3 - 10^4 \text{ W/cm}^2$ reichen nur noch zum Härten und Aufwärmen des Materials aus.

Bei allen Verfahren absorbiert das Werkstück einen Teil des Laserstrahls, ein zweiter wird reflektiert und ein dritter durchdringt das Werkstück ohne Wechselwirkung (Transmission). Das Verhältnis von Absorption, Reflexion und Transmission ist vom Werkstoff abhängig. Bei Metallen gibt es zum Beispiel keine Transmission.



Laserstrahl trifft auf das Werkstück

Fig. 48014

Absorptionsgrad

Der Absorptionsgrad ist entscheidend. Er hängt ab von:

- Wellenlänge.
- Polarisierung.
- Auftreffwinkel des Laserstrahls.
- Werkstoff.
- Temperatur.
- Aggregatzustand.
- Geometrie des Werkstücks.
- Oberfläche des Werkstücks.

Je höher der Absorptionsgrad ist, desto mehr Energie wird in das Werkstück eingebracht und steht dann für die Bearbeitung zur Verfügung.

2. Laserschweißen

Heute gibt es außer dem Gasschmelz- und Lichtbogenschweißen eine Vielzahl von Schweißverfahren für spezielle Aufgabenbereiche. Denn unterschiedliche Werkstoffe erfordern unterschiedliche Verfahren. Alleine für das Schweißen von Metallen sind zahllose Techniken bekannt, wobei der Laser immer mehr zum Einsatz kommt.

Andere herkömmliche Schweißverfahren wie zum Beispiel WIG (Wolfram-Inertgasschweißen), MAG (Metall-Aktivgasschweißen) oder Plasmaschweißen erreichen die für einen Tiefschweißeffekt erforderlichen Energiedichten nicht.

2.1 Prinzip des Laserschweißens

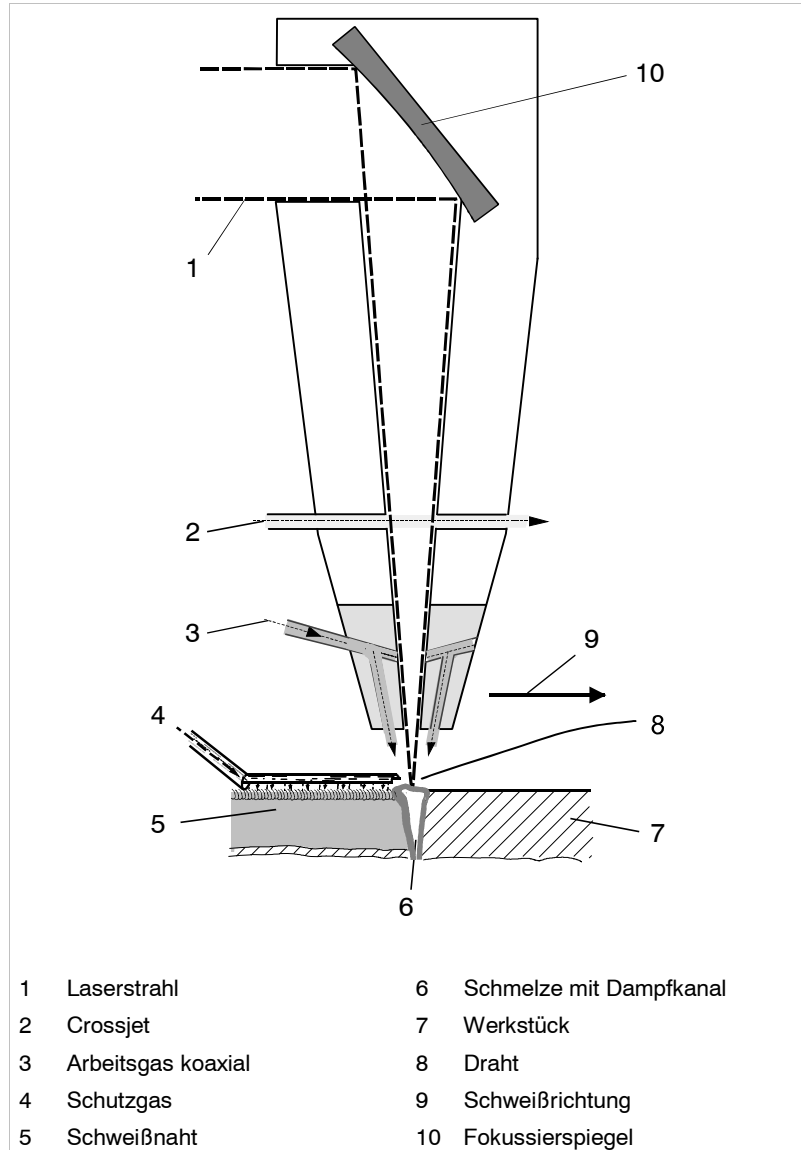
Über den Laserstrahl gelangt die Energie, die für den Schweißprozess notwendig ist, in das Werkstück. Diese Energie wird über Umlenkspiegel und Fokussiereinrichtung, z. B. Fokussierspiegel, dorthin geführt, wo sie wirken soll, zur Fügestelle des Werkstückes.

Schweißvorgang

Das Werkstück wird in einer Spannvorrichtung genau positioniert und fixiert, so dass der Laserstrahl exakt auf den Fügespalt gelenkt wird. Der Schweißkopf bewegt sich entlang der Fügestellen über das Werkstück. Die enorme Energiedichte des Laserstrahls im Fokus – etwa 10^6 W/cm^2 – bringt den Werkstoff zum Schmelzen und teilweise zum Verdampfen.

Der Druck des abströmenden Metaldampfes kann so hoch werden, dass im Werkstoff ein Dampfkanal entsteht – das so genannte "keyhole" (Schlüsselloch). Dieses keyhole dringt, jedoch nur bei hohen Leistungsdichten, einige Millimeter tief in das Material ein.

Bewegt sich der Schweißkopf nun über das Werkstück, dann wandert das keyhole unter dem Schweißkopf mit. Dahinter fließt die Schmelze ineinander. Der aufgeschmolzene und durchmischte Werkstoff kühlt ab und die Schmelze erstarrt zu einer schmalen Schweißnaht.



Prinzip des Laserschweißens

Fig. 24697

Schutz- und Arbeitsgas

Die Schweißnaht wird während der Bearbeitung durch ein Schutzgas vor Reaktionen mit der Luft geschützt. So wird verhindert, dass die abkühlende Metallschmelze in der Naht mit Sauerstoff, Feuchtigkeit oder Kohlendioxid reagiert und dabei oxidiert.

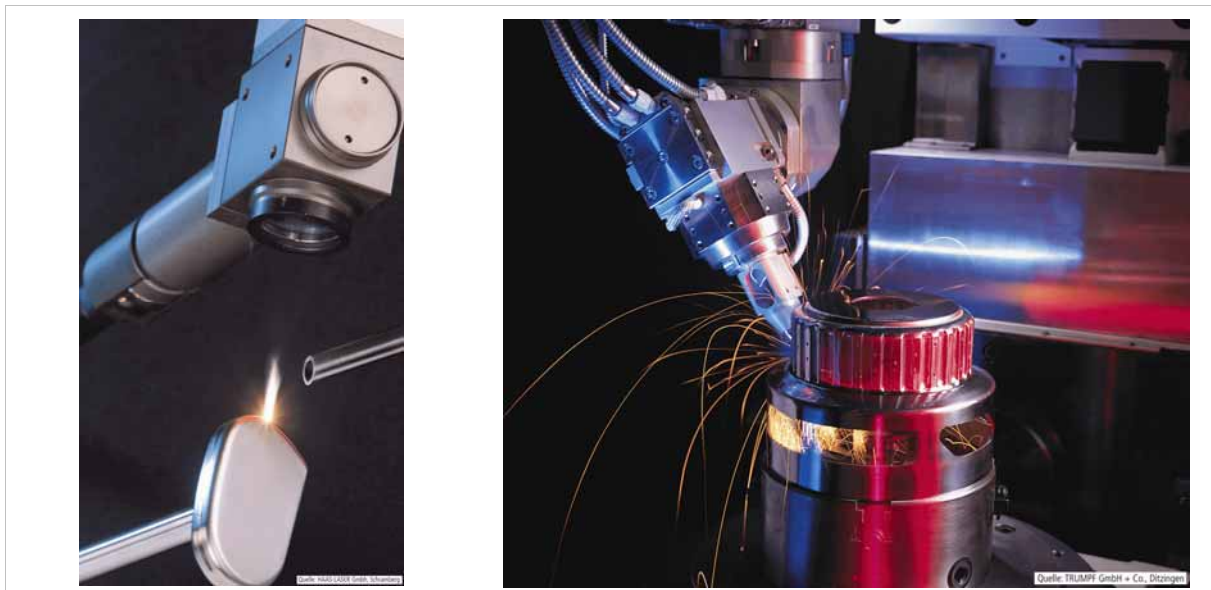
Das Arbeitsgas verhindert die Bildung einer Plasmawolke, die eine Strahlaufweitung durch thermal blooming (siehe Kapitel 3, Abschnitt 2) nach sich ziehen würde. Die Strömungsrichtung und Gasmenge müssen so angepasst sein, dass sie das Schmelzbad nicht beeinflussen.

Als Schutz- oder Arbeitsgas werden je nach Werkstoff Helium (He), Argon (Ar), Stickstoff (N₂) oder Gasgemische eingesetzt. Tritt das Gas aus der gleichen Düse wie der Laserstrahl aus, spricht man von einer coaxialen Zuführung. Bei der seitlichen Zuführung wird das Gas durch eine separate Düse auf die Bearbeitungsstelle geleitet. Selbst in der Spannvorrichtung kann eine Gasdüse untergebracht sein.

2.2 Schweißverfahren

Beim Schweißen mit Laser werden zwei Schweißverfahren unterschieden: das Wärmeleitungsschweißen und das Tiefschweißen.

Beim Wärmeleitungsschweißen wird der Werkstoff nur an der Oberfläche geschmolzen. Dabei entstehen Schweißnähte von einigen Zehntel Millimetern Tiefe. Dieses Schweißverfahren ist bei gepulsten Festkörperlaser gebräuchlich, die zum Schweißen von Bauteilen für die Elektronik-Industrie oder bei medizinischen Kleinteilen eingesetzt werden.



Schweißen eines Herzschrittmachers mit Festkörperlaser
Schweißen eines Getriebeteils mit CO₂-Laserschweißkopf

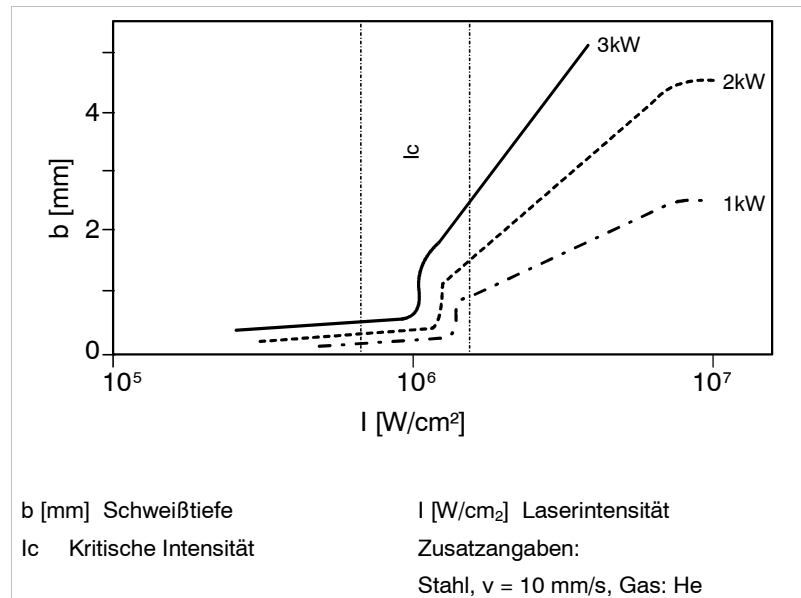
Fig. 123_009, 123_010

Beim Fertigen von Getriebeteilen, Profilen oder dickwandigen Rohren sind sehr tiefe und schmale Schweißnähte erforderlich. In diesen Fällen wird mit dem CO₂-Laser im cw-Betrieb tiefgeschweißt.

Eine Sonderform des Tiefschweißens ist das Tiefschweißen mit Zusatzwerkstoffen, das immer dann zum Einsatz kommt, wenn große Spaltbreiten und Blechdicken bearbeitet werden.

Tiefschweißen

Bei sehr hohen Leistungsdichten (etwa 1 Megawatt pro Quadrat-zentimeter) erhitzt der Laserstrahl den Werkstoff soweit, dass er an der Oberfläche nicht nur schmilzt, sondern auch verdampft.



Laserintensität und Schweißtiefen

Fig. 25389

Dampfkanal = keyhole

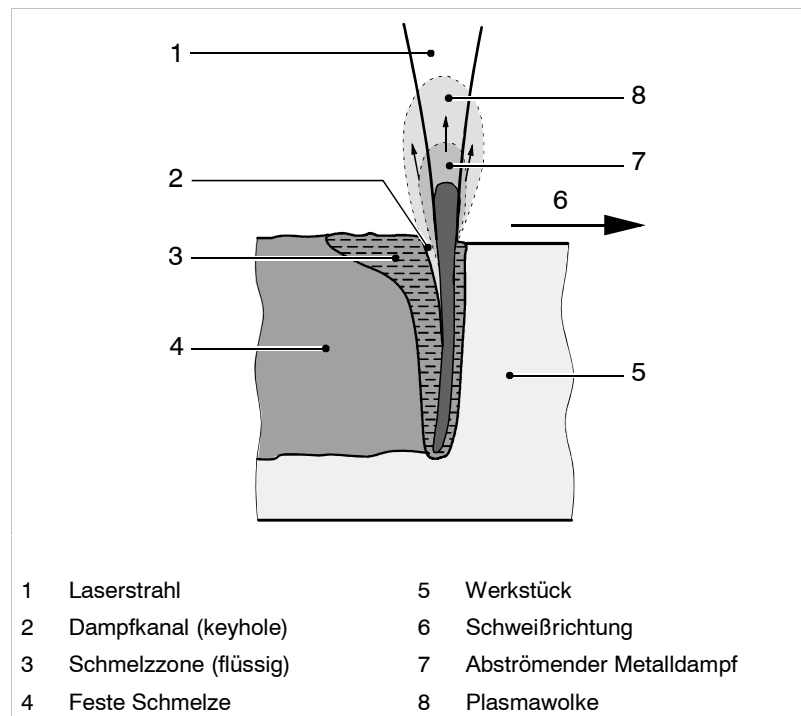
Durch das Verdampfen des Werkstoffs und den Druck des abströmenden Metaldampfes entsteht im Werkstück ein Dampfkanal, das so genannte "keyhole" (englisch für Schlüsseloch). An dessen schmelzflüssigen Wänden wird der Laserstrahl vielfach reflektiert. Dabei absorbiert die Schmelze den Laserstrahl fast vollständig und der Wirkungsgrad des Schweißprozesses steigt. Zusätzlich absorbiert der verdampfte Werkstoff Laserenergie und wird ionisiert: Es entsteht ein laserinduziertes Plasma. Dieses sollte möglichst verhindert werden, da das Plasma den Dampfkanal "verstopft".

Beim CO_2 -Laser kommt noch ein weiterer Effekt hinzu: Der Absorptionsgrad des Plasmas für die Wellenlänge des CO_2 -Lasers ist höher als der Absorptionsgrad für die Schmelze. Das führt dazu, dass die Energie nach Entstehen des Plasmas fast vollständig in das Werkstück eingebracht werden kann.

Der Dampfkanal ist von einer flüssigen Phase umgeben, in der die Schmelze wegen des enormen Temperatur- und Druckgefälles heftig zirkuliert. Er folgt den Bewegungen des Schweißkopfes - er wird also vom Schweißkopf entlang der Naht "gezogen". Die Schmelze strömt ständig um den Dampfkanal und erstarrt an dessen Rückseite. Auf diese Weise entsteht eine schmale, tiefe Schweißnaht mit gleichmäßigem Gefüge.

Die beim Tiefschweißen hohen Schweißgeschwindigkeiten führen zu einer kleinen Wärmeeinflusszone und dadurch zu geringem Verzug.

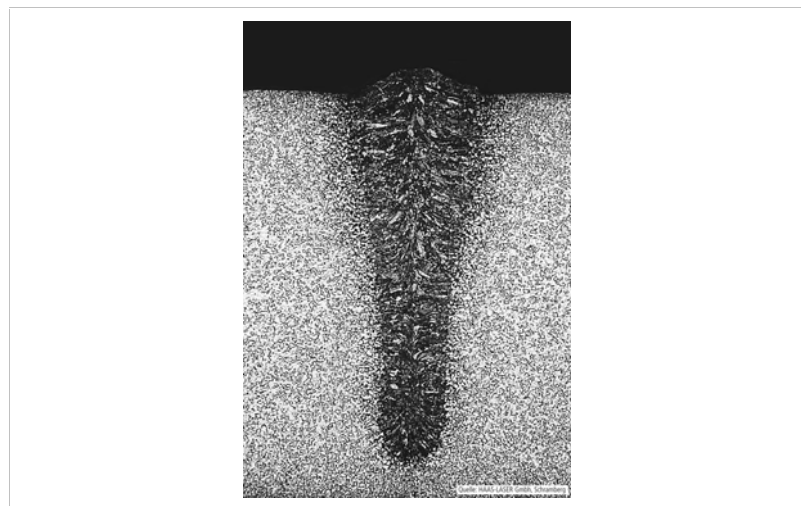
Die Ausbildung des Dampfkanals wird als "Tiefschweißeffekt" bezeichnet, da durch diesen Effekt die erreichbare Schweißnahttiefe sehr viel größer wird als beim Wärmeleitungsschweißen. Ein Beispiel: Mit einem 12 kW-CO₂-Laser und einem Vorschub von 0.5 m/min werden in Baustahl 19 mm tiefe Schweißnähte erzeugt.



Prinzip des Tiefschweißens

Fig. 48225

Beispiel



Beispiel einer tiefgeschweißten Schweißnaht

Fig. 125_18

Tiefschweißen mit Zusatzwerkstoffen

Dieses Verfahren ist eine Variante des oben beschriebenen Tiefschweißens. Beträgt die Spaltbreite mehr als 5 % der Schweißtiefe, kann die Schmelze den Abstand zwischen den Werkstücken nicht mehr vollständig überbrücken. Die Schweißnaht fällt ein oder - im äußersten Fall - werden die Werkstücke nicht mehr miteinander verbunden.

In diesen Fällen sind Zusatzwerkstoffe notwendig, die während des Schweißprozesses als Draht oder Pulver zugeführt werden. Wie viel Draht oder Pulver benötigt wird, ist abhängig von der Schweißgeschwindigkeit, Spaltbreite und Schweißtiefe. Neben der Dosierung ist die exakte Positionierung des sehr dünnen Drahtes (Durchmesser etwa 0.8 bis 1.2 mm) von ebenso großer Bedeutung.

Zusatzwerkstoffe haben noch eine andere Bedeutung. Durch Einbringen der Stoffe in die Schmelze werden die metallurgischen Eigenschaften der Schmelze bzw. der Schweißnaht gezielt verändert. Dadurch können zum Beispiel Schweißbarkeit, Festigkeit, Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit etc. verbessert werden.

Hybridverfahren

Kombiniert man Laserschweißen mit anderen Schweißverfahren, zum Beispiel MIG- oder MAG-Schweißen (Metall-Inert-Gas- und Metall-Aktiv-Gas-Schweißen), spricht man vom Hybridverfahren. Dieses Verfahren wird nur für Spezialanwendungen eingesetzt, zum Beispiel im Schiffsbau. Hier werden große Blechplatten mit bis zu 20 m Länge und 15 mm Dicke verschweißt. Die Spaltabstände sind so groß, dass der Laserstrahl sie allein nicht überbrücken kann.

Deshalb kombiniert man MIG-Schweißen mit Laserschweißen. Der Laser liefert die hohe Leistungsdichte für große Nahttiefen, erlaubt hohe Schweißgeschwindigkeiten und reduziert so Wärmeeinbringung und Verzug. Mit dem MIG-Brenner wird mit Hilfe eines Zusatzdrahtes der Spalt überbrückt und die Fuge geschlossen. Vorteile des Hybridverfahrens: Es ist schneller als das MIG-Schweißen und die Teile verziehen sich weniger.

Scannerschweißen

Beim Scannerschweißen wird der Laserstrahl über eine Scanneroptik mit großem Abstand zum Werkstück geführt. 1 oder 2 bewegliche Spiegel positionieren den Laserstrahl blitzschnell auf dem Werkstück. Dadurch kann die Strahlquelle höher ausgelastet werden, denn Positionierzeiten zwischen 2 Nähten, in denen der Laserstrahl ausgeschaltet wird, verringern sich fast auf Null. Daher wird das Scannerschweißen gerne bei vielen kurzen Nähten eingesetzt. Eine optimale Schweißreihenfolge ermöglicht eine minimale Wärmeeinbringung und dadurch einen minimalen Verzug. Mit dem Scannerschweißen werden Überlappnähte und Stumpfstöße geschweißt. Das Schutzgas wird über die Spannvorrichtung zugeführt.

2.3 Merkmale des Verfahrens

Um zwei Werkstücke mit dem Laserstrahl optimal zu verbinden, müssen vorher die Anforderungen an die Verbindung ermittelt und anschließend berücksichtigt werden:

- Welche Nahtgeometrie ist für das Werkstück am besten geeignet bzw. welchen Ansprüchen muss sie genügen?
- Welche Vorbereitungen müssen getroffen werden, damit eine optimale Naht entsteht?
- Muss die Verbindung gas- und flüssigkeitsdicht sein?
- Wie viel Wärme darf in das Werkstück kommen?

Nahtgeometrie und Nahtart

Die Nahtgeometrie beschreibt, wie die Kanten der Fügepartner aufeinander treffen. Sie können z. B. einander überlappen oder stumpf aneinander stoßen.

Es gibt verschiedene Arten von Nahtgeometrien (siehe untenstehende Tabelle). Im Überblick sind ihre Eigenschaften und besonders beständige Geometrien beschrieben.

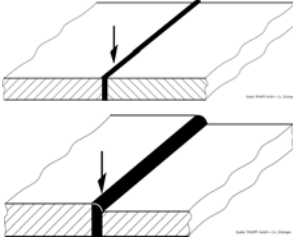
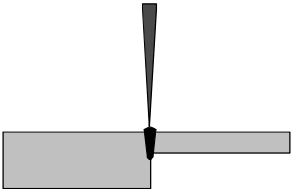
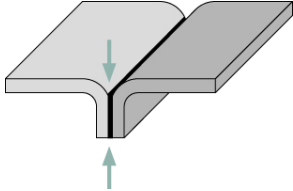
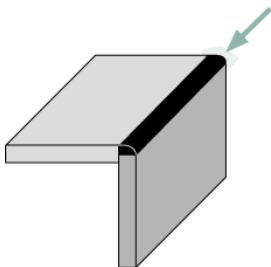
| Nahtgeometrie | Beschreibung | Günstigste Nahtgeometrie |
|---|---|---|
| I-Naht  | <ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedliche Blechdicken möglich. • Günstigster Kraftfluss. • Gute Zugänglichkeit. • Aufwändige Vorbereitung. • Besonderheiten: Der Fugespalt muss sehr klein sein. |  |
| Bördelnaht  | <ul style="list-style-type: none"> • Sehr geringer Vorbereitungsaufwand. • Hohe Steifigkeit. • Ungünstiger Kraftfluss. • Sehr gute Zugänglichkeit. • Besonderheiten: Höherer Materialaufwand. | |
| Ecknaht  | <ul style="list-style-type: none"> • Geringer Verputzaufwand. • Nur 90°-Winkel schweißbar. • Besonderheiten: Festkörperlaser bei dieser Nahtgeometrie vorteilhafter. | |

Fig. 128_27G, 128_28G, 48035, 48037

Tab. 5-1

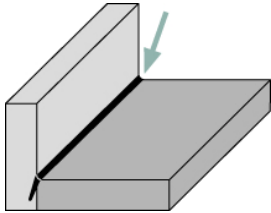
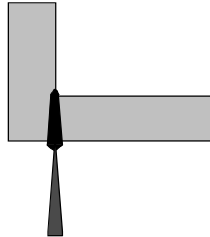
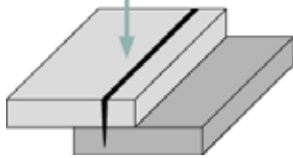
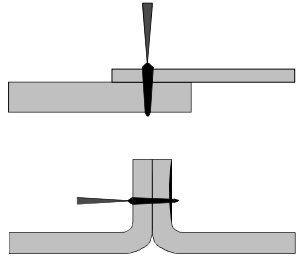
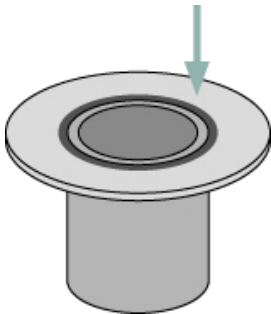
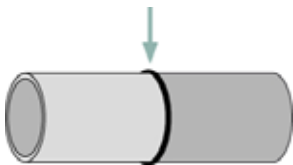






| Schweißnaht | Beschreibung | Günstigste Nahtgeometrie |
|---|---|---|
| <p>Kehlnaht</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Vorbereitung. • Günstiger Kraftfluss. • Ungünstige Zugänglichkeit. • Besonderheiten: Neigt wegen der schlechten Zugänglichkeit zu Bindefehlern. |  |
| <p>Überlappnaht</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Geringer Vorbereitungsaufwand. • Gute Zugänglichkeit. • Kraftübertragung über den Nahtquerschnitt. • Ungünstiger Kraftfluss. |  |
| <p>Axialrundnaht</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Entspricht einer I-Naht. • Vorbereitung: Heften oder Presspassung. Grund: Der gegenüberliegende Spalt wird durch Querschrumpfung am Nahtanfang erweitert. • Günstiger Kraftfluss. • Zugänglichkeit ist abhängig von der Werkstückgeometrie. | |
| <p>Radialrundnaht</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Entspricht einer I-Naht. • Einfache Vorbereitung. • Günstiger Kraftfluss. • Gute Zugänglichkeit. • Keine Schrumpfung. • Besonderheiten: Die Radialnaht ist der Axialnaht vorzuziehen (besseres und leichteres Fixieren möglich). | |

Fig. 48036, 48038, 48039, 48040

Tab. 5-2

Nahtart Nach der Nahtgeometrie wird die Nahtart festgelegt. Wird die Naht durchgezogen oder werden einzelne Schweißpunkte gesetzt? Besteht die Naht aus vielen kurzen Strichen oder vielen kleinen Kreisen? Wichtig ist: Die Naht muss die geforderte Festigkeit erreichen und darf nicht zu viel Wärme in das Bauteil bringen.

| Form | Grafik | Bewertung |
|-------------------------|---|---|
| Durchgezogene Linie |  | <ul style="list-style-type: none"> • Schnell und einfach zu fertigen. • Am Anfang und Ende der Naht ist die mechanische Spannung bei Belastung am höchsten (Spannungsspitzen). • Geringere Einschweißtiefe an Anfang und Ende. |
| Linie aus Einzelpunkten |  | <ul style="list-style-type: none"> • Geringere Erwärmung durch Pulsen. • Das Werkstück kühlt in den Pausen zwischen den Pulsen ab. |
| Gesteppte Linie |  | <ul style="list-style-type: none"> • Wärmeeinbringung geringer als bei durchgezogener Linie. • Geringere Einschweißtiefe an Anfang und Ende jedes Nahtabschnitts. |
| Oval |  | <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Festigkeit bei Schälbelastung. • Doppelte Schweißlänge. • Höhere Wärmeeinbringung. |
| Rund gesteppt |  | <ul style="list-style-type: none"> • Höhere Festigkeit bei Schälbelastung als gesteppte Linie. • Allerdings auch höhere Wärmeeinbringung. |
| Freie Formen |  | <ul style="list-style-type: none"> • Form wird für die Belastung optimiert. • Wärmeeinbringung wird optimiert. |

Tab. 5-3

Nahtvorbereitung

Insbesondere die Stoßkanten und die Oberflächen der Werkstücke erfordern beim Laserschweißen eine sorgfältigere Vorbereitung als bei konventionellen Schweißverfahren.

Die Breite des Fügespaltens spielt eine wesentliche Rolle beim Entscheiden, welches Verfahren gewählt wird: Tiefschweißen mit oder ohne Zusatzwerkstoff.

Stoßkanten Beim Tiefschweißen entsteht nur eine kleine Schmelzzone, die eine sehr genaue Fertigung der Fügeteile erfordert. Die Stoßkanten sollten bündig aneinander liegen. Die Rauheit darf nicht größer sein als die Spaltbreite. Aus diesem Grund ist ganz entscheidend, mit welchem Verfahren die Fügeteile gefertigt wurden.



Spanend gefertigte Teile können sehr gut mit dem Laser geschweißt werden. Teile, die mit Laser oder Wasserstrahl bearbeitet wurden, eignen sich normalerweise gut. Fügeteile mit genibbelten Kanten dagegen sind ungeeignet, da sie eine zu hohe Rauigkeit aufweisen.

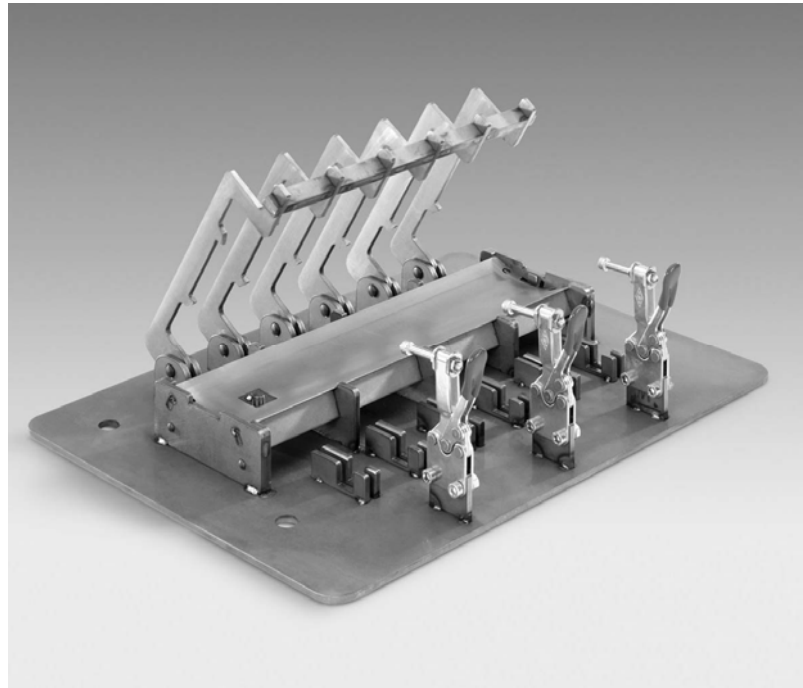
Oberflächen Je sauberer die Oberfläche ist, desto besser wird die Schweißnaht. Hohe Schweißgeschwindigkeiten und kleine Schmelzvolumen verhindern, dass entstehende Gase aus der Schmelze entweichen können.

So lassen sich Fügeteile mit leicht geölter Oberfläche bei geeigneten Schweißparametern gut schweißen. Stark gefettete oder verschmutzte Oberflächen müssen vorher sorgfältig gereinigt werden. Bleche, die eine Zunder-, Lack-, Rost- oder Eloxalschicht haben, zeigen nach dem Schweißen häufig starke Porenbildung, Schmelzauswürfe und Fehlstellen.

Fügespalt Die maximale Breite des Fügespaltes ist abhängig von der Schweißgeschwindigkeit und der Schweißtiefe. So kann bei einer Überlappnaht die Breite des Fügespaltes etwa um den Faktor 1.5 höher sein als bei einer I-Naht. Beträgt der Spalt zwischen zwei zu verschweißenden Teilen jedoch mehr als 5 % ihrer Dicke, ist Füllmaterial erforderlich. In der Regel wird das Füllmaterial als Draht zugeführt.

Spannvorrichtungen

Um beim Schweißen gute Ergebnisse zu erzielen, werden alle Teile einer Baugruppe in eine passende Spannvorrichtung gelegt. Diese muss vorher vom Konstrukteur entworfen werden.



Spannvorrichtung

Fig. 48226

Aufgaben

- Die Spannvorrichtung ermöglicht es, die Bauteile der Baugruppe immer auf gleiche Weise genau zu positionieren und zu fixieren.
- Sie stellt enge Fügespalte unter 0,1 mm sicher.
- Sie kann Fertigungstoleranzen ausgleichen, z. B. Maßabweichungen, die in vorhergehenden Fertigungsschritten entstanden sind.
- In bestimmten Anwendungen, z. B. Schweißen mit Scanneroptik, kann sie auch Schutz- und Arbeitsgas zuführen.

Spannvorrichtungen verfügen über Auflageflächen und Anschläge, die das Werkstück tragen und ausrichten. Sie sind zum Teil sehr komplex aufgebaut. Spannelemente auf der Vorrichtung fixieren das Werkstück.

Fügehilfen Der Vorrichtungsaufwand kann erheblich reduziert werden, wenn am Werkstück Fügehilfen angebracht sind. Die Werkstücke sind dann bereits zueinander positioniert und die Spannvorrichtung wird nur zum Spannen der Werkstücke benötigt. Fügehilfen sind unter anderem:

- Abstecken
- Verzapfen
- Anschlagen
- Zentrieren

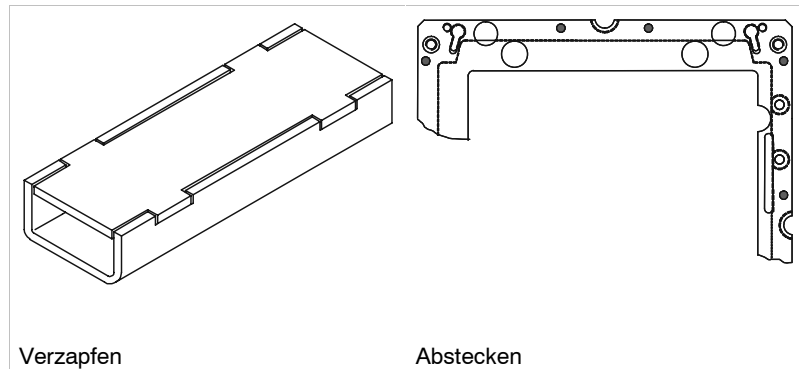
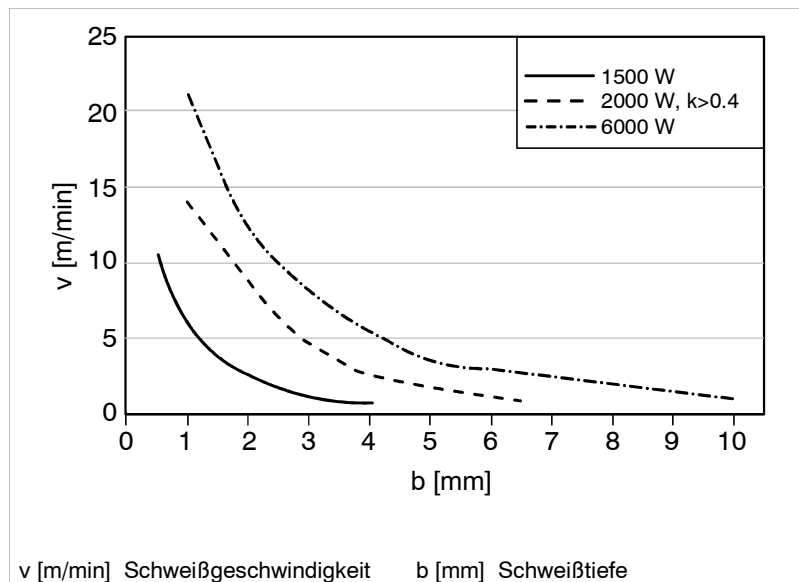


Fig. 48227, 48228

Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit



Schweißgeschwindigkeiten und Schweißtiefe in Abhängigkeit von der Laserleistung

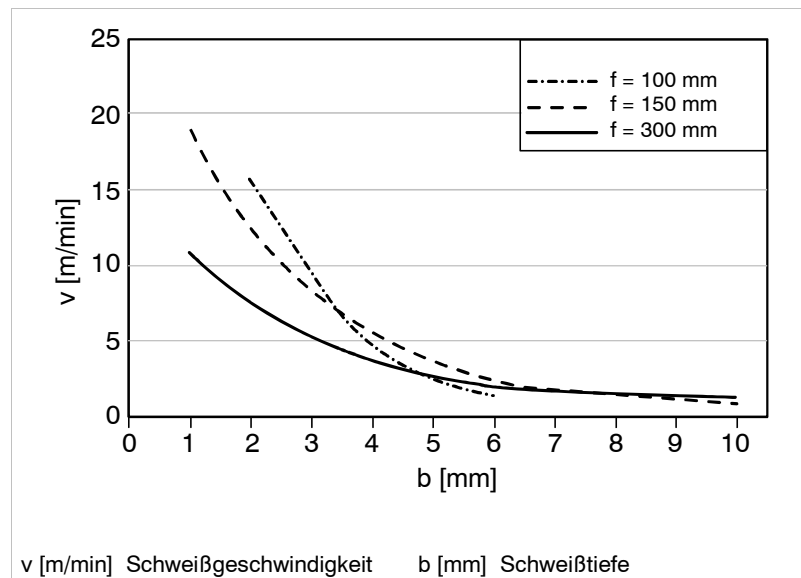
Fig. 25390

Die Laserleistung muss an die Dicke des Werkstücks angepasst sein: Je größer die Materialdicke, umso höher sind die zum Schweißen benötigten Laserleistungen.

Mit höheren Laserleistungen können auch höhere Schweißgeschwindigkeiten und größere Schweißnahttiefen erreicht werden.

Über die Schweißgeschwindigkeit sind Schweißnahttiefe und Schweißnahtgeometrie beeinflussbar. Hohe Schweißgeschwindigkeiten führen zu schlanken, aber weniger tiefen Schweißnähten. Zusätzlich kann mit der Schweißgeschwindigkeit das Nahtgefüge positiv beeinflusst werden. Dies ist dann wichtig, wenn Werkstoffe geschweißt werden, deren Schmelze beim Erstarren zu Aufhärtungen oder verstärkt zu Rissen neigt.

Strahlqualität und Brennweite



Schweißgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Brennweite

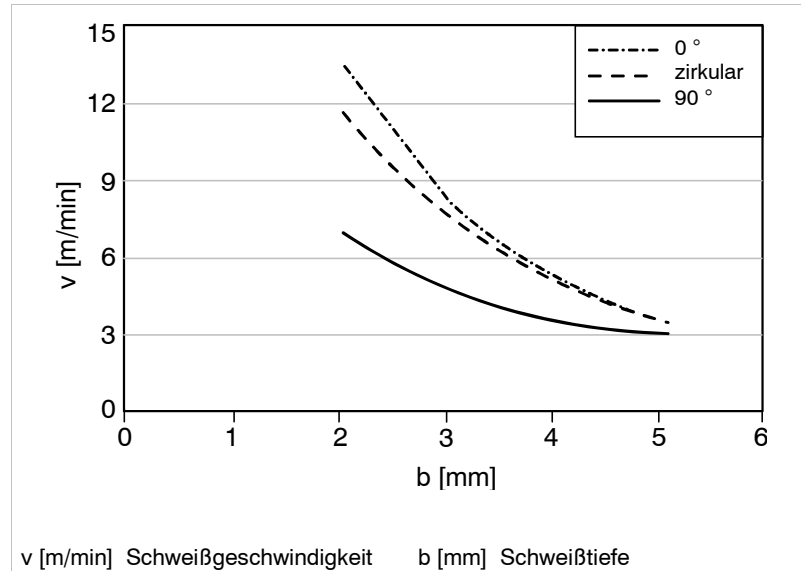
Fig. 25391

Die Strahlqualität beschreibt die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls. Ein Laser verfügt dann über einen Laserstrahl mit guter Strahlqualität, wenn der Strahl bei großer Schärfentiefe auf einen kleinen Brennfleck fokussiert werden kann.

Beim Laserschweißen ist einerseits ein Laserstrahl mit kleinem Fokusbereich von Vorteil, um eine hohe Energiedichte auf kleinster Fläche und damit hohe Schweißgeschwindigkeiten zu erreichen. Andererseits muss die Schärfentiefe an die Schweißtiefe angepasst werden. Ist die Brennweite kurz und der Fokusbereich klein, dann werden die höchsten Schweißgeschwindigkeiten bei geringen Schweißtiefen erreicht.

Hohe Schweißgeschwindigkeiten erreicht man bei tiefen Schweißnähten nur mit langen Brennweiten.

Polarisation



Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Polarisation

Fig. 25392

Die Polarisation des Laserlichts beeinflusst den Querschnitt von tiefen Nähten. Mit linear polarisiertem Laserlicht wird die größte Einschweißtiefe erreicht, wenn das Laserlicht parallel zur Vorschubrichtung schwingt und unter einem flachen Winkel auf die Schweißfront trifft. Die geringste Tiefe wird erreicht, wenn Polarisation und Vorschubrichtung senkrecht zueinander stehen. Dieser Effekt nimmt mit steigender Schweißgeschwindigkeit zu.

Beim kontinuierlichen Schweißen mit gleicher Richtung, z. B. beim Zusammenschweißen von Rohren wird dieser Effekt positiv genutzt. Wird jedoch in verschiedenen Richtungen geschweißt, dann wirkt er sich störend aus. In diesen Fällen wird bei CO_2 -Lasern mit zirkular polarisiertem Laserlicht gearbeitet. Dadurch wird das Schweißergebnis unabhängig vom Verlauf der Naht.

2.4 Vorteile und Einsatzmöglichkeiten

Vergleicht man das Laserschweißen mit den konventionellen Schweißverfahren, die mit dem Lichtbogen arbeiten, so liegt der große Vorteil in der Möglichkeit des Tiefschweißens. Bei den anderen Verfahren ist es nicht möglich, die erforderlichen Energiedichten für einen Tiefschweißeffect zu erreichen.

Weitere Vorteile

- Neben dem Elektronenstrahl-Schweißverfahren erreicht nur noch der Laser so hohe Energiedichten, die zum Schweißen erforderlich sind.
- Die Werkstücke werden berührungslos und mit hoher Geschwindigkeit geschweißt. Dies führt zu kurzen Bearbeitungszeiten.
- Es entstehen sehr schlanke Nahtgeometrien mit einem großen Tiefe-Breiten-Verhältnis. Der Verzug ist minimal, die Festigkeit hoch.
- In einem kleinen Bereich ist eine gezielte Energieeinwirkung möglich. Dadurch wird eine sehr kleine Wärmeeinflusszone erreicht, die thermische Belastung des Werkstücks sowie der Verzug sind gering.
- Mit dem Laserschweißverfahren sind auch schwer zugängliche Bereiche innerhalb des Werkstücks gut erreichbar.
- Die schmale, gleichmäßige Schweißnahtoberfläche und die geringe Spritzerbildung erfordern nur geringe Nacharbeit oder sie entfällt ganz.
- Die gute Steuerbarkeit des Laserstrahls erlaubt einen hohen Automatisierungsgrad des Schweißprozesses. Zudem kann das Laserschweißen gut mit anderen Fertigungsschritten kombiniert werden.
- Gute Prozesskontrolle durch Überwachen der Parameter mit der Maschinensteuerung und Sensoren.

Einsatzmöglichkeiten

In der industriellen Praxis wird das Laserschweißen überwiegend zum Verbinden von verschiedenartigen verzugsgefährdeten Bauteilen, beschichteten Materialien und Blechpaketen eingesetzt.

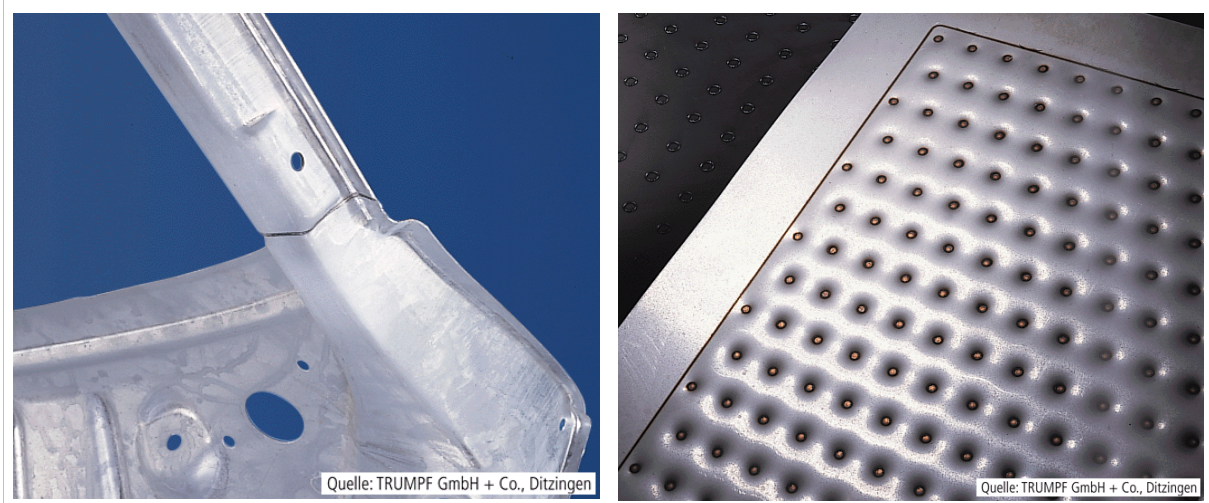
Die Legierungselemente bestimmen die Schweißbarkeit der Werkstoffe und damit die Bereiche in denen der CO₂-Laser zum Einsatz kommt.

Stähle

Bei Stählen hängt die Schweißbarkeit der Werkstücke in erster Linie vom Kohlenstoffanteil ab. Baustähle mit einem Kohlenstoffanteil kleiner als 25% eignen sich gut zum Schweißen. Mit zunehmendem Kohlenstoffanteil bis zu 35 % verschlechtert sich deren Schweißbarkeit. Grund: Kohlenstoff führt zu einer Aufhärtung der Schweißnaht. Es treten Spannungen innerhalb der Schweißnaht auf, die beim Abkühlen dann zu Rissen führen können. In diesen Fällen haben sich in der Praxis ein Vorwärmen der Werkstücke vor dem Schweißprozess und ein langsames Abkühlen der Schweißnaht beim Erstarren der Schmelze von Vorteil erwiesen. Stähle mit einem Kohlenstoffanteil höher als 35 % sind sehr schlecht zu schweißen.

Chrom-Nickel-Stähle sind allgemein gut schweißbar und erlauben wegen ihrer geringeren Wärmeleitfähigkeit höhere Schweißgeschwindigkeiten. Wird beim Schweißen ein Schutzgas zugeführt, dann kann eine oxidfreie Schweißraupe entstehen.

Beispiele:



Links: CO₂-lasergeschweißte Tailored Blanks
Rechts: CO₂-lasergeschweißter Plattenwärmetauscher

Fig. 126_020, 126_022

Nichteisenmetalle

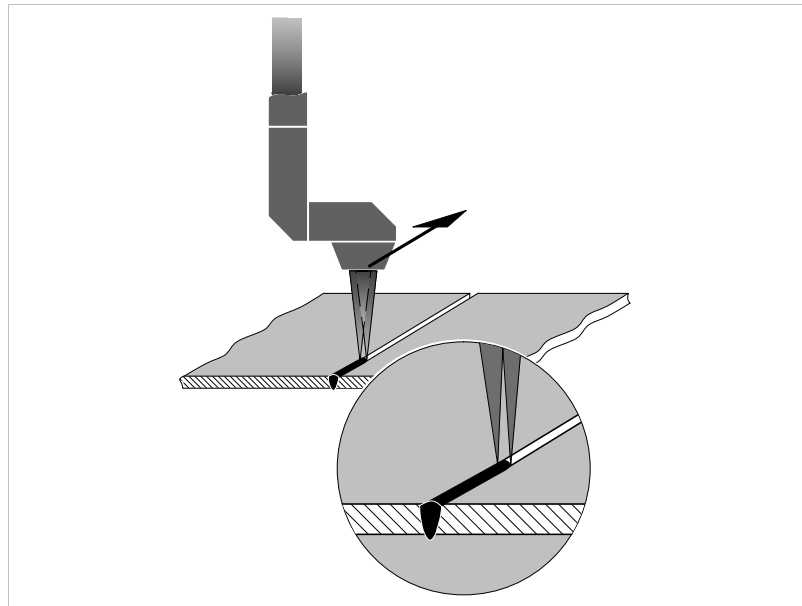
Nichteisenmetalle sind grundsätzlich weniger gut zu schweißen als Stähle. Das liegt daran, dass diese Legierungen einen geringeren Absorptionsgrad für die Laserstrahlung besitzen als es bei Stählen der Fall ist.

Hier hat der Nd:YAG-Laser gegenüber dem CO₂-Laser einen prinzipiellen Vorteil: Die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers wird von Nichteisenmetallen besser absorbiert als die des CO₂-Lasers. Trotzdem werden viele Nichteisenmetalle heutzutage mit guten Ergebnissen geschweißt.

Einige Beispiele:

Bei **Aluminium** und **Aluminiumlegierungen** muss wegen der dünnflüssigen Schmelze mit großer Sorgfalt im Umgang mit Arbeits- und Schutzgasen gearbeitet werden. Eine genaue Abstimmung der Zusammensetzung der Gase und deren Strömungsgeschwindigkeiten beim Schweißprozess gewährleisten sehr gute Schweißnähte.

Zur besseren Überbrückung von Spalttoleranzen und zur Verminderung von Nahtauswürfen dient die Zweistrahltechnik TwistLas. Durch eine geeignete Strahlformung in der Fokussieroptik werden auf dem Werkstück 2 separate Fokuspunkte mit einstellbarem Abstand voneinander erzeugt. Mit diesem "Doppelfokus" wird das keyhole so erweitert, dass keine Nahtauswürfe entstehen können. TwistLas wird hauptsächlich bei der Bearbeitung von Aluminium und Aluminiumlegierungen eingesetzt. Die äußerst dünnflüssige Schmelze führt sehr leicht zu einer unregelmäßigen Schweißnaht.



Schweißen mit Doppelfokus

Fig. 17271

Titan und Titanlegierungen sind mit dem Laser gut zu schweißen. Eine Eigenschaft erschwert jedoch den Schweißprozess - sie reagieren heftig mit den Hauptbestandteilen der Luft: Sauerstoff und Stickstoff. Hier muss sowohl beim Schweißen als auch beim Abkühlen der Schweißnaht gezielt mit Schutzgas oder sogar in Schutzgasatmosphäre gearbeitet werden.

Bunt- und Edelmetalle sind mit dem CO₂-Laser praktisch nicht zu schweißen. Hier wird der Nd:YAG-Laser eingesetzt, weil diese Metalle gegenüber dem Nd:YAG-Laser ein höheres Absorptionsvermögen besitzen. Dies betrifft vor allem die Schmuckindustrie.

2.5 Hochwertige Nähte erkennen

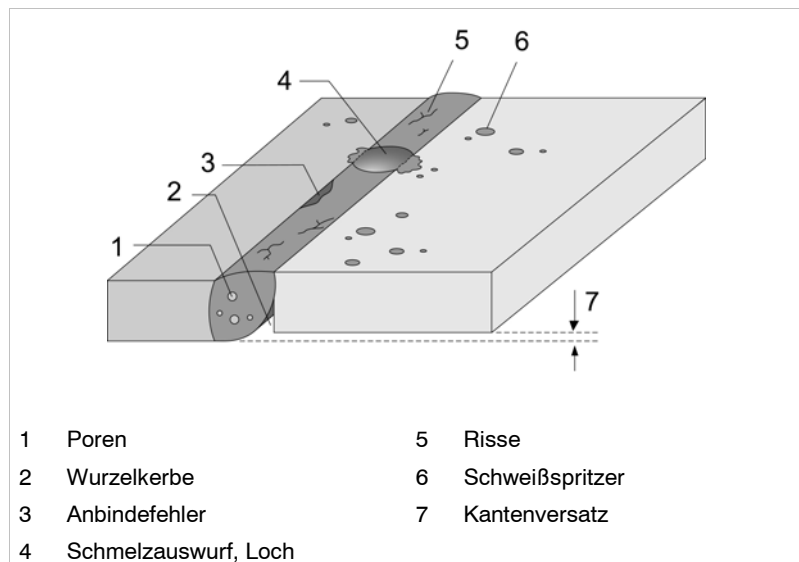
An die Schweißnaht werden hohe Anforderungen gestellt.

Breite und Tiefe Breite und Tiefe der Naht müssen die definierten Werte erreichen, denn sie bestimmen die Festigkeit der Naht. In der Regel sollten Breite und Tiefe über die gesamte Naht hinweg konstant sein.

Metallurgische Eigenschaften Für alle metallischen Schweißnähte gilt: Das Gefüge der Naht sollte möglichst gleichmäßig und feinkörnig sein. Weitere Eigenschaften der Naht hängen von den Legierungsbestandteilen ab.

In der Schweißnaht verbinden sich die Schmelzen der Fügepartner. Werden Fügepartner eines Werkstoffs verbunden, können die Eigenschaften denen des Grundwerkstoffs entsprechen. Bestehen die Fügepartner aus unterschiedlichen Werkstoffen oder werden Zusatzwerkstoffe verwendet, bildet sich eine Legierung. Je nach eingesetztem Werkstoff können bestimmte Eigenschaften erzielt werden: Chrom oder Nickel machen die Naht korrosionsbeständiger. Mit Silizium als Legierungsbestandteil können Heißrisse beim Schweißen von Aluminiumlegierungen vermieden werden.

Nahtfehler



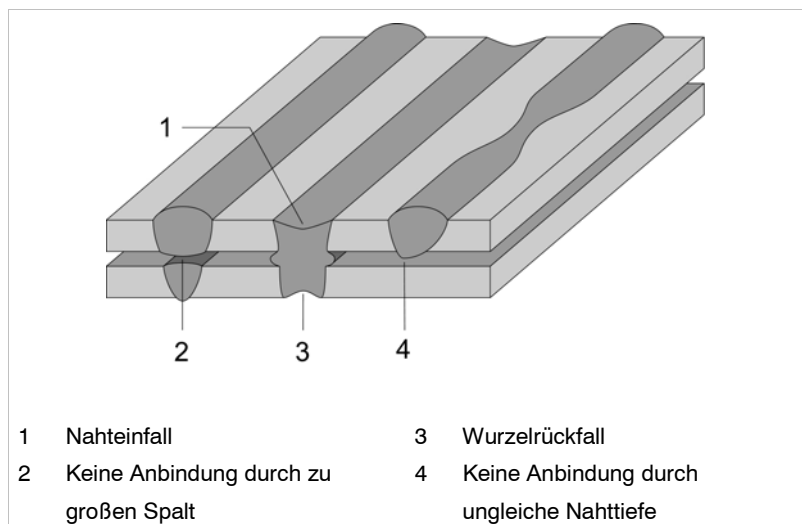
Äußere und innere Nahtfehler, die beim Laserschweißen auftreten können - am Beispiel einer Stumpfstoßverbindung

Fig. 48047

Technische Normen unterscheiden äußere und innere Nahtfehler.

| Äußere Nahtfehler | Auswirkung |
|---|---|
| Einbrand- oder Wurzel- fehler | Naht kann an diesen Stellen reißen. |
| Schmelzauswurf | Beim Auswurf der Schmelze aus der Naht entstehen Löcher, die die Festigkeit verringern. Außerdem wird die Naht undicht. |
| Nahteinfall und Wurzel- rückfall | Verringern Nahtquerschnitt und damit die Festigkeit. |
| Kantenversatz bei I-Naht am Stumpfstoß | Verringert Nahtquerschnitt. |
| Mulden am Nahtende (Endkrater) | Verringern Nahtquerschnitt; entstehen, wenn Laserstrahl zu schnell abgeschaltet wird. |
| Oxidation der Ober- und Unterraupe | Korrosionsbeständigkeit von rostfreien Stählen wird reduziert. |
| Spritzer auf Werkstück oder Naht | Stören und erfordern Nacharbeit. |

Tab. 5-4



Fehler, die beim Tiefschweißen am Überlappstoß auftreten können

Fig. 48048

Fehler in der Naht durch Qualitätsmängel im Werkstoff oder falsch eingestellte Prozessparameter:

| Innere Nahtfehler | Auswirkung |
|---|---|
| Anbindefehler | Der Fügespalt ist nicht vollständig gefüllt. |
| Poren | Die Naht enthält kleine Luft- und Gasblasen. |
| Risse in der Nahtoberfläche oder im Werkstück | Entstehen beispielsweise durch Spannungen oder Materialschrumpfung beim Abkühlen. |

Tab. 5-5

Wärmeeinbringung und Verzug

Die Schmelze gibt die Wärme an das umgebende Material ab. Auch bei den geringen Wärmemengen des Laserschweißens, kann sich das Werkstück verziehen oder es werden empfindliche Teile beschädigt.

Um eine hohe Qualität zu erreichen, darf das Werkstück möglichst wenig erwärmt werden und die Wärme muss gut abfließen können. Gestepte Nähte erwärmen das Werkstück weniger stark als durchgezogene Schweißlinien. Der Verzug ist entsprechend geringer. Arbeitet der Laserstrahl im Pulsbetrieb, kann das Material in den Pausen zwischen den Pulsen abkühlen. Mit gekühlten Vorrichtungen, die die Wärme gut ableiten, lässt sich das Abkühlen beschleunigen.

Viele Schweißpunkte und -nähte bringen viel Wärme in das Werkstück. Um ein Verziehen zu vermeiden, wird die Schweißreihenfolge so angepasst, dass es sich gleichmäßig erwärmt.

2.6 Maschinen und Anlagen

Es gibt viele Faktoren, von denen der Aufbau einer Laserschweißanlage abhängt:

- Form des Werkstücks.
- Nahtgeometrie.
- Nahtart.
- Stückzahl.
- Automationsgrad der Fertigung.
- Verfahren und Werkstoff.

1D-Anlagen Um Rohre und Kanten zu schweißen, genügen Anlagen mit nur einer Bewegungsachse, wie die Kantenschweißmaschine oder die Rohrschweißanlage. Dabei wird entweder das Werkstück oder die Bearbeitungsoptik bewegt.

3D-Anlagen Meist verbindet der Laserstrahl dreidimensionale Bauteile mit ebensolchen Nahtgeometrien. Dann nutzt man koordinatengeführte Laseranlagen mit 5 Bewegungsachsen und einer beweglichen Optik. In der Automobilindustrie werden in der Regel Roboter in Kombination Festkörperlasern eingesetzt.

Anlagen zum Scannerschweißen Für das Scannerschweißen stehen 2 Maschinenkonzepte zur Auswahl: die Scannerschweißanlage und der Roboter, der die Scanneroptik trägt.

Bei der Scannerschweißanlage wird das Werkstück im Arbeitsfeld unter der Scanneroptik positioniert und anschließend geschweißt. Sollen viele Teile mit kurzen Bearbeitungszeiten geschweißt werden, können sie auch kontinuierlich unter der Optik hindurch bewegt werden. Man spricht dann von fliegender Bearbeitung.

Wird mit dem Roboter geschweißt, fährt dieser die großräumigen Konturen, wie z. B. den Umriss einer Autotür, ab. Die Scanneroptik ist für die genaue Positionierung des Laserstrahls zuständig und bewegt ihn über das Werkstück. Dieses Schweißverfahren ist steuerungstechnisch höchst anspruchsvoll, denn die Maschinensteuerung muss die überlagerte Bewegung von Roboter und Scanneroptik koordinieren. Die Steuerung misst im Millisekunden-takt die exakt räumliche Position des Roboters und vergleicht die Position mit dem programmierten Weg. Weicht die Position ab, gleicht die Steuerung dies mit Hilfe der Scanneroptik aus.

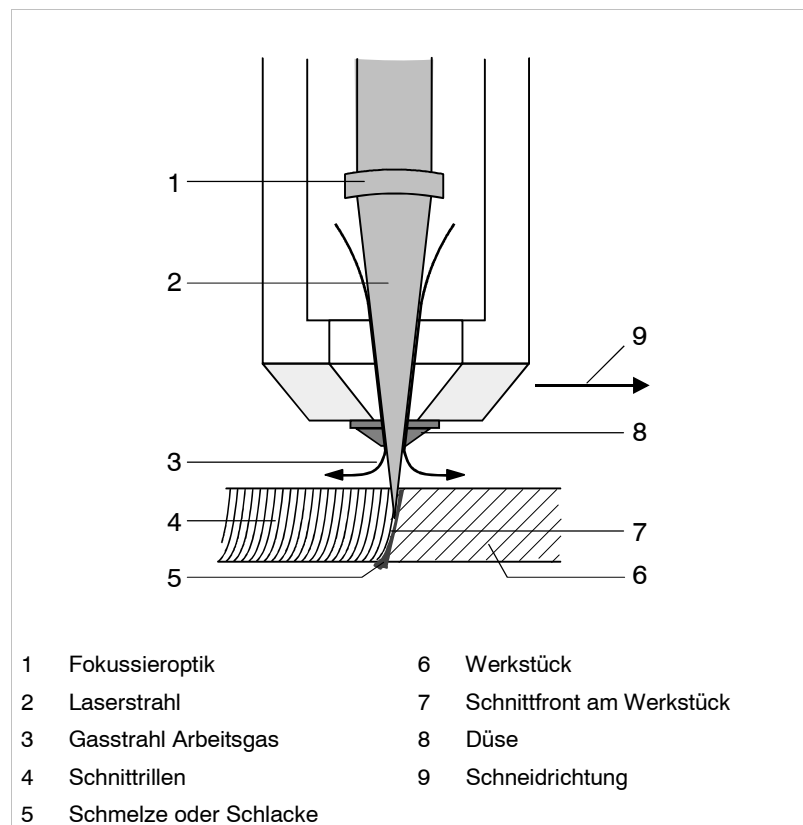
3. Laserschneiden

In den 1970er Jahren wurden die ersten Laser, damals CO₂-Laser mit 200 bis 500 Watt Leistung, zum Schneiden eingesetzt. Der große Durchbruch wurde erst mit der Entwicklung der Schneidanlagen erreicht. Denn der Laser benötigt ein System, das den Laserstrahl lenkt und punktgenau an den Ort der Bearbeitung führt.

3.1 Prinzip des Laserschneidens

Was geschieht beim Auftreffen des Laserstrahls auf den Werkstoff?

Trifft der Laserstrahl auf das Werkstück, wird das Material so stark erwärmt, dass es schmilzt oder verdampft. Hat er das Werkstück vollständig durchdrungen, beginnt der Schneidprozess. Der Laserstrahl bewegt sich entlang der Teilekontur und schmilzt das Material fortlaufend auf. Dieses wird mit Hilfe eines Gasstroms aus der Schnittfuge geblasen. Ein enger Schnittpalt zwischen Teil und Restgitter entsteht. Der Schneidgasstrom tritt zusammen mit dem Laserstrahl aus der Düse aus.



Prinzip des Laserschneidens

Fig. 24695



Einstechen Der Laserstrahl muss zunächst das Material an einer Stelle punktförmig durchdringen, bevor eine Kontur geschnitten werden kann. Das Einstechen kann schnell mit voller Laserleistung oder langsam über eine sog. Leistungsrampe erfolgen. Beim Erzeugen eines Startlochs im Rampenbetrieb wird die Laserleistung allmählich gesteigert, dann solange konstant gehalten bis das Startloch erzeugt wurde und anschließend wieder langsam reduziert.

Auch beim Einstechen kann der Prozess durch Hinzufügen eines Gases unterstützt und die Schneidergebnisse beeinflusst werden.

Die Auswahl des Einstechgases oder des Schneidgases ist davon abhängig, welches Material bearbeitet und welche Qualitätsansprüche an das Werkstück gestellt werden.

Als Schneidgas verwendet man in der Regel entweder Sauerstoff, Stickstoff, Argon oder einfach Luft.

3.2 Schneidverfahren

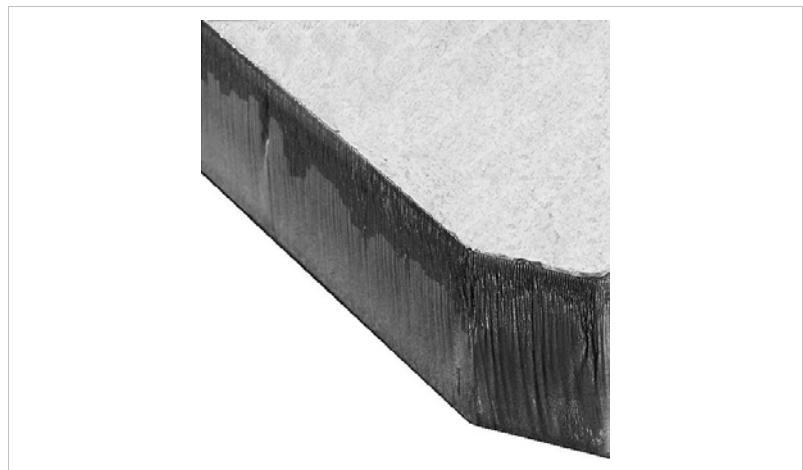
Ob mikrometergenaue Schnittfugen im hauchdünnen Halbleiterchip oder Qualitätsschnitte im 30 mm dicken Stahlblech, der Laser erledigt heute ganz unterschiedliche Schneidaufgaben. Dazu werden verschiedene Schneidverfahren eingesetzt.

Schneiden mit Sauerstoff: Brennschneiden

Beim Brennschneiden wird mit Sauerstoff (Gasreinheit 99.95 Volumenprozent, 3.5) und einem Druck von maximal 6 bar überwiegend Baustahl geschnitten. Das erwärmte Metall reagiert in der Schnittfuge mit dem Sauerstoff, es verbrennt und oxidiert. Die entstandene Schmelze wird zusammen mit den Eisenoxiden aus der Schnittfuge ausgeblasen.

Der Oxidationsvorgang liefert zusätzliche Energie (exotherme Reaktion), die den Schneidprozess dahingehend beeinflusst, dass höhere Schneidgeschwindigkeiten möglich sind und größere Materialdicken bearbeitet werden können als beim Schneiden mit Stickstoff.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die Oxidschicht, die sich an den Schnittflächen bildet. Werden die Teile anschließend lackiert, muss die Oxidschicht vorher abgetragen werden. Bricht die Schicht auf, ist das Teil nicht mehr gegen Korrosion geschützt.



Schneiden mit Sauerstoff: Ausschnitt einer Schnittkante

Fig. 24694

Schneiden mit Stickstoff: Schmelzschnneiden

Beim Schmelzschnneiden werden Stickstoff oder Argon als Schneidgase eingesetzt. Auch bei diesem Verfahren wird das Material zuerst geschmolzen und mit Hilfe des Schneidgases - in der Regel Stickstoff - aus der Schnittfuge ausgeblasen. Eine Reaktion mit dem aufgeschmolzenen Metall erfolgt nicht. Ausnahme Titan: Soll Titan geschnitten werden, muss Argon als Schneidgas eingesetzt werden, da Titan mit Stickstoff heftig reagiert (Gasreinheit Argon: 99.996 Volumenprozent, 4.6). In der Praxis wird mit einem Gasdruck zwischen 2 bis 20 bar (so genanntes Hochdruckschneiden) gearbeitet (bei einer Gasreinheit des Stickstoffes von 99.999 Volumenprozent, 5.0).

Hochdruckschneiden

| | O ₂ | N ₂ |
|-----------|----------------|----------------|
| | 1,2 mm Düse | 2,3 mm Düse |
| 1 - 3 mm | 4 bar | 20 bar |
| 5 - 30 mm | 0,3 bar | 20 bar |

Vergleich der Drücke beim Brenn- und Hochdruckschneiden mit Stickstoff

Tab. 5-6

Durch den hohen Gasdruck wird erreicht, dass die Schnittkanten weitgehend frei von Gratbildung bleiben und sich keine Schlacke festsetzt. Eine Nachbearbeitung ist nicht notwendig.

Außerdem liefert der Einsatz von inerten Gasen oxidfreie Schnittkanten, erschwert jedoch das Einstechen zu Beginn des Schneidprozesses. Aus diesem Grund gibt es bei einigen Schneidanlagen die Möglichkeit, mit Sauerstoff einzustechen und dann mit Stickstoff weiterzuschneiden.



Schneiden mit Stickstoff: Teil mit oxidfreier Schnittkante

Fig. 078_021

**Druckluftschneiden**

Zum Schneiden dünner Bleche kann auch Druckluft eingesetzt werden. Druckluft mit 5 bis 6 bar genügt, um die Schmelze aus dem Schnittpalt zu blasen. Da Luft zu 80 % aus Stickstoff besteht, ist das Druckluftschneiden überwiegend ein Schmelzschneidverfahren. Die Druckluft muss jedoch komprimiert, getrocknet und entölt werden, deshalb stellt sie nicht wirklich ein kostengünstigeres Verfahren dar. Welche Blechdicke geschnitten werden kann, hängt vom Druck der Druckluft und der Laserleistung ab. Mit einer Laserleistung von 5 kW und einem Druck von 6 bar lässt sich 2 mm dickes Blech gratfrei schneiden. Die besten Schneidergebnisse werden in Aluminium erzielt.

Plasmaunterstütztes Laserschneiden

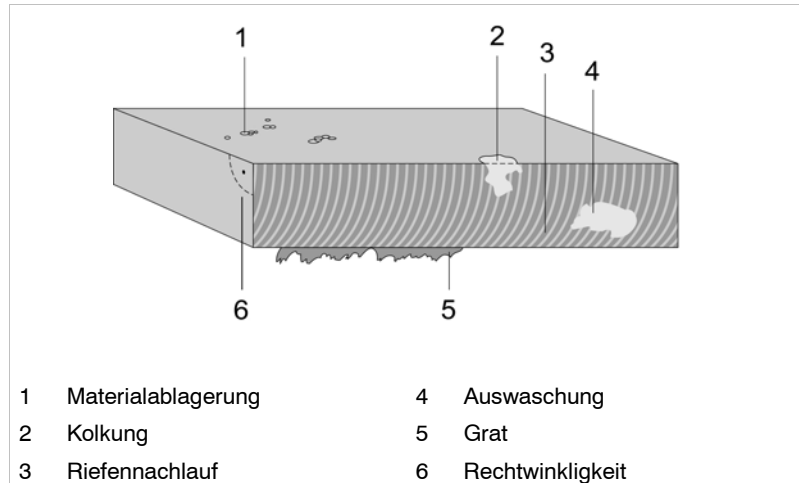
Beim plasmaunterstützten Laserschneiden wird im Schnittpalt eine Plasmawolke erzeugt. Sie besteht aus ionisiertem Metaldampf und ionisiertem Schneidgas. Sie absorbiert den Teil des CO₂-Laserstrahls, welcher ohne Plasmawolke ungenutzt durch den Schneidspalt hindurchstrahlen würde und gibt die Energie seitlich an die Schnittkante ab. Das Material schmilzt somit schneller auf, höhere Schneidgeschwindigkeiten werden erreicht.

Die Plasmawolke ist jedoch nur im Dünnblechbereich bis 3 mm Blechdicke von Vorteil. Bei größeren Blechdicken verhindert eine Plasmawolke im Schnittpalt, dass der Laserstrahl das Werkstück noch vollständig durchstrahlen kann. Der Schneidprozess "reißt ab". Um dies zu verhindern, wird bei höheren Blechdicken mit Sensoren überwacht und geregelt, so dass im Schnittpalt keine Plasmawolke mehr entsteht (PlasmaLine).

In dünnen Blechen kann mit sehr hohen Schneidgeschwindigkeiten gearbeitet werden. 40 Meter und mehr pro Minute bei einer Blechdicke von 1 mm sind möglich. Die Schnittkante ist allerdings rauer als beim Schmelzschneiden mit Stickstoff. Die maximale Blechdicke hängt wiederum von der Laserleistung ab. Mit 6 kW Laserleistung lassen sich zum Beispiel bis zu 4 mm dicke Aluminiumtafeln mit diesem Verfahren besonders schnell bearbeiten.

3.3 Schneidkriterien

Schneidkriterien wie Kolkungen, Grat oder Riefennachlauf können mit bloßem Auge beurteilt werden. Für die Rautiefe, Rechtwinkligkeit und Spaltbreite werden Hilfsmittel benötigt. In der Praxis muss festgelegt werden, wann welche Kriterien wichtig sind. Die Funktion des Teils ist dabei entscheidend.



Kriterien für die Qualität der Schnittkante

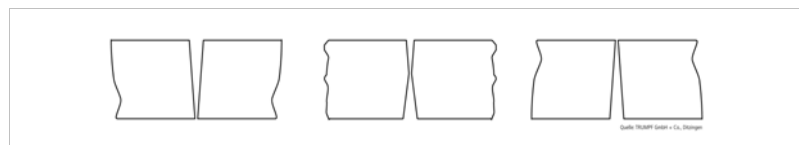
Fig. 48022

Rautiefe

Beim Schneiden der Konturen mit dem Laserstrahl bilden sich an den Schnittflächen senkrecht Riefen. Deren Tiefe bestimmt die Rautiefe. Je geringer die Rautiefe, desto glatter ist die Schnittfläche. Beim Laserschneiden mit CO₂-Lasern gilt grundsätzlich, dass die Rautiefe mit zunehmender Materialdicke größer wird.

Schnittspaltform und Schnittspaltbreite

Beim Laserschneiden entsteht ein Schnittspalt, der in der Regel nicht parallel von der Schnittoberkante zur Schnittunterkante verläuft.



Schnittspaltformen beim Laserschneiden

Fig. 079_024G

Die Schnittspaltbreite steigt mit zunehmender Materialdicke. Sie hängt von den folgenden Faktoren ab:

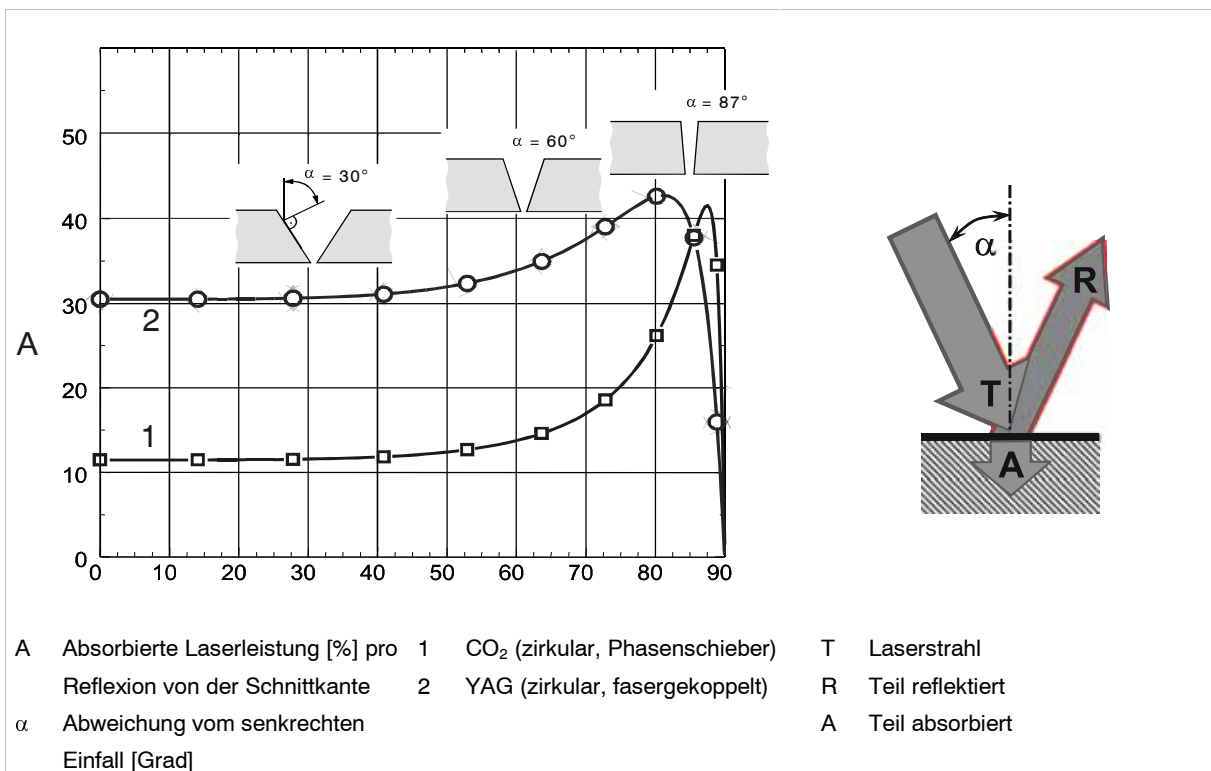
- Fokussdurchmesser
- Werkstoff
- Wellenlänge
- Schneidverfahren

Sie variiert zwischen 0.15 mm (Materialdicken von 1 - 6 mm) und bis zu 0.5 mm (Materialdicken von 20 - 30 mm). Die Breite muss über den gesamten Arbeitsbereich der Maschine konstant sein, da sonst die Maße der Teile und Konturen ungenau werden.

Mit CO₂-Lasern werden schmälere Schnittspalte als mit Festkörperlaser erreicht. Die Gründe sind:

- Die maximale Absorption der Laserleistung liegt für CO₂-Laser bei einem Winkel von 87°, im Gegensatz zu einem Winkel von 82° bei YAG-Lasern.
- Die Absorption bei einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ beträgt bei CO₂-Lasern 12 %, bei $\alpha = 87^\circ$ 42 %. Der YAG-Laser dagegen absorbiert bereits bei 0° 32 % der Laserstrahlung und 43 % bei 82° (vgl. Seite 5-4).

Einsatzgebiete des CO₂-Lasers sind deshalb das Schweißen und Schneiden von Dünn- und Dickblech, während der YAG-Laser nur im Dickblech eingesetzt wird.



Absorbierte Laserleistung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Fig. 48223, 48222

Gratfreiheit

Die Gratfreiheit zählt zu den wichtigsten Qualitätskriterien für Lagerschnitte. Denn Grate müssen immer entfernt werden, d.h. ein zusätzlicher Arbeitsgang ist notwendig. Viele verschiedene Grate können sich bilden: vom krümeligen Schlackerest, der sich leicht entfernen lässt, bis zum scharfen metallischen Grat, der fest mit der Kantenunterseite verbunden ist.

Material und Laserleistung

Die Laserleistung muss an das Verfahren, die Materialart und die Materialdicke angepasst sein. Die maximale Materialdicke, die geschnitten werden kann, hängt von der Materialart und der Laserleistung ab. Allgemein gilt: Mit zunehmender Laserleistung nimmt auch die Materialdicke zu, die noch bearbeitet werden kann.

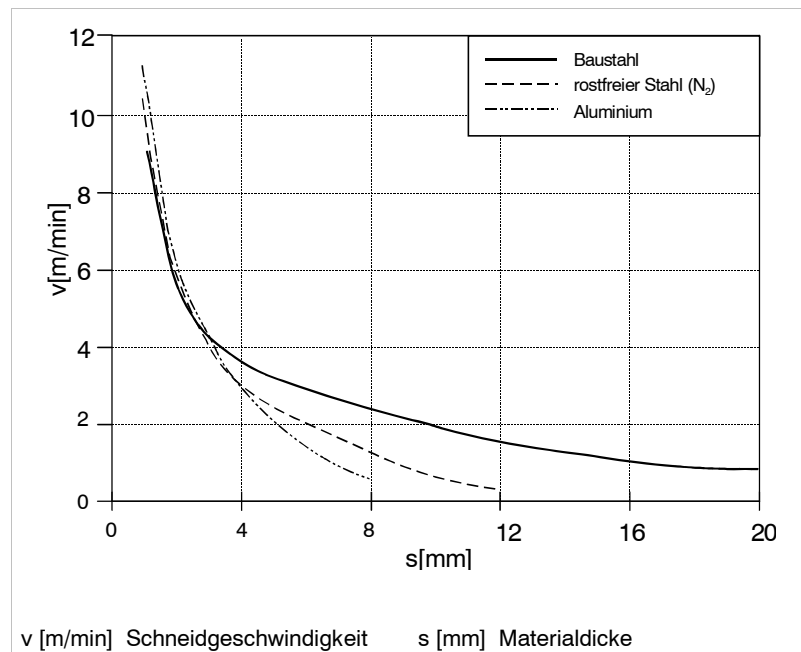
Betriebsart

Mit der Betriebsart - Dauerstrich oder Pulsen - lässt sich steuern, wie viel und wie lange Energie in das Werkstück eingebracht wird, also kontinuierlich oder in kurzen Abständen. Standardkonturen im Millimeter- und Zentimeterbereich werden im Dauerstrichbetrieb geschnitten. Filigrane Konturen dagegen werden mit niedrigen Frequenzen gepulst, sonst kann Verzug auftreten. In den Pausen kann die Wärme abfließen und das Werkstück kühlt sich ab.

Schneidgeschwindigkeit

Die Schneidgeschwindigkeit muss – wie die Laserleistung – der Materialart und Materialdicke angepasst werden. Eine falsche Schneidgeschwindigkeit kann zu Rauigkeit, Gratbildung oder Einbränden an der geschnittenen Kontur führen. Wird die Kontur zu schnell geschnitten, kann es vorkommen, dass das Material nicht mehr getrennt wird.

Grundsätzlich gilt: Je mehr Laserleistung zur Verfügung steht, desto schneller kann geschnitten werden. Bei gleicher Laserleistung sinkt die Schneidgeschwindigkeit mit zunehmender Materialdicke.



Maximale Schneidgeschwindigkeit mit 4000 W Laserleistung in Abhängigkeit von der Materialdicke

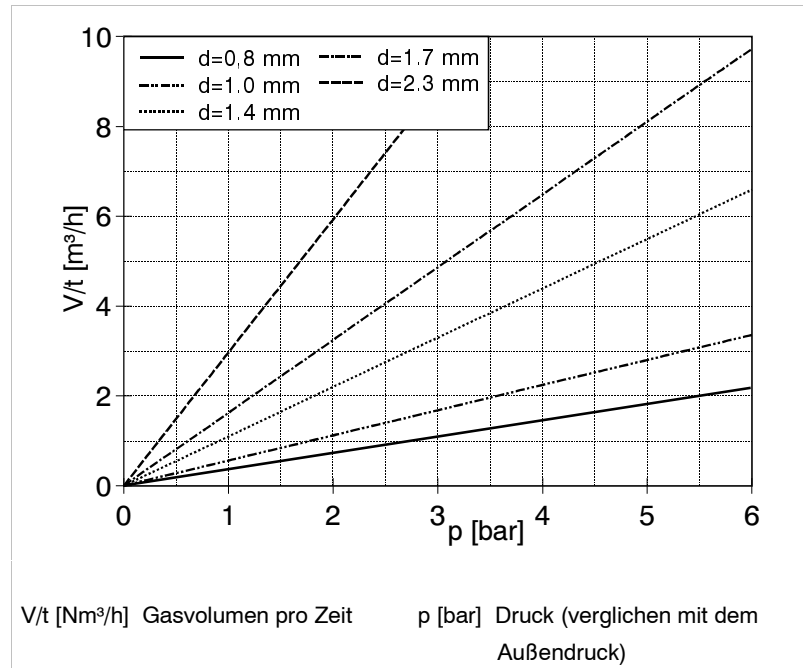
Fig. 18730

Gasverbrauch beim Brennschneiden und Schmelzschneiden

Der Gasverbrauch ist abhängig vom Schneidgasdruck und der Größe der Düsenbohrung.

Grundsätzlich gilt: Je höher der Gasdruck und je größer die Düsenbohrung ist, umso mehr Schneidgas wird verbraucht.

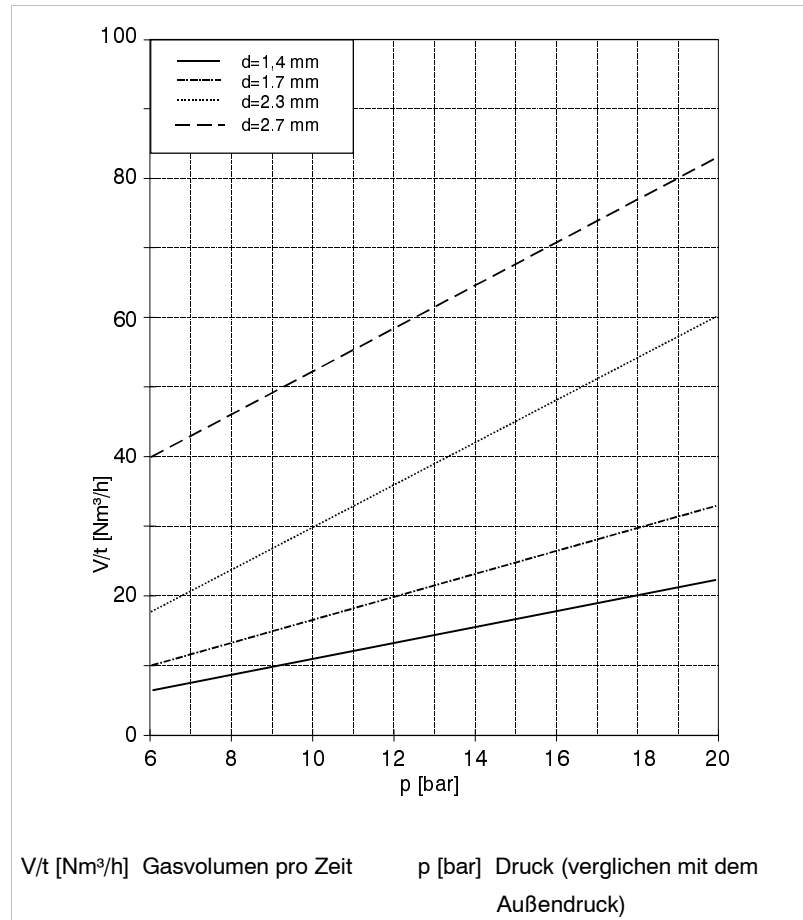
Beispiel: Schneiden mit Sauerstoff bei Schneidgasdrücken bis 6 bar.



Maximaler Schneidgasverbrauch pro Stunde bei permanentem Schneiden

Fig. 8809

Beispiel: Schneiden mit Stickstoff bei Schneidgasdrücken bis 20 bar.



Maximaler Schneidgasverbrauch pro Stunde bei permanentem Schneiden

Fig. 23507

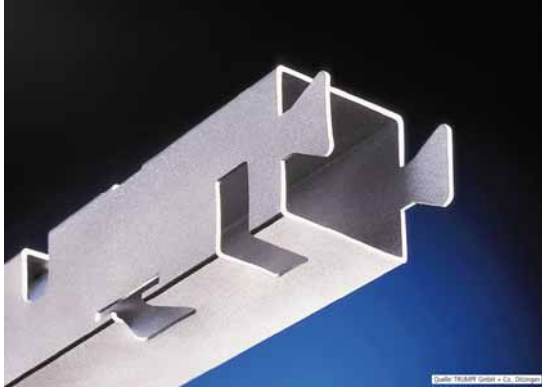
3.4 Vorteile und Einsatzmöglichkeiten

Vorteile Das Laserschneiden weist gegenüber anderen Trennverfahren wie Plasmaschneiden, Stanzen und Nibbeln oder Drahterodieren viele Vorteile auf:

- Es ist eine berührungslose und kräftefreie Bearbeitung des Werkstücks möglich.
- Anders als beim Stanzen und Nibbeln kann nahezu jede Konturform erzeugt werden, ohne dass ein einziger Werkzeugwechsel erforderlich ist.
- Mit dem Laserstrahl lassen sich sowohl sehr große Ausschnitte in beliebigen Formen als auch kleine, filigrane und komplizierte Konturen schneiden. Besonders schnell werden Geometrien mit nur wenigen Einstichen bearbeitet.
- Das Trennen erfolgt präzise. Der Schnittspalt ist sehr gering und kann weitgehend konstant gehalten werden. Das Einhalten von Toleranzen bis zu 0.05 mm kann auch in der Serienproduktion eingehalten werden.
- Die Schneidgeschwindigkeit ist hoch. Dadurch ist z. B. im Vergleich zum Drahterodieren eine erhebliche Beschleunigung des Produktionsablaufs möglich.
- Durch die hohe Energiedichte kann die Wärmeeinflusszone sehr klein gehalten werden: Einhärttiefen von 0.1 bis 0.2 mm sind möglich. Es bildet sich eine Oxidschicht beim Schneiden mit Sauerstoff.
- Die geringe Erwärmung des Materials gewährleistet einen allenfalls geringen Verzug des Werkstücks.
- Die Rautiefe der Schnittflächen ist gering: kleiner als 100 µm. Eine Nachbearbeitung des Werkstücks entfällt.
- Bei den gebräuchlichsten Stählen kann ohne jeden Grat geschnitten werden, das nachträgliche Entgraten entfällt.

Einsatzmöglichkeiten

In der industriellen Praxis werden mit dem Laserstrahl flache Werkstücke, aber auch runde oder eckige Rohre und Profile mit unterschiedlichen Querschnitten und aus unterschiedlichen Materialien bearbeitet.



Vierkantrohr und Zentrierstern mit Laser geschnitten

Fig. 078_20, 081_029

Es werden hauptsächlich metallische Werkstoffe wie Baustahl, Werkzeugstahl, Rostfreie Stähle (CrNi-Stähle) und Aluminium und Aluminiumlegierungen geschnitten.



Links: Lasergeschnittene Teile bei einer Autotür aus Baustahl
Rechts: Lasergeschnittene Edelstahlkanne

Fig. 076_017, 083_034

Bei nichtmetallischen Werkstücken wie Pappe, Holz, Leder, Glas, Keramik, Kunststoffen (wie z. B. Plexiglas, Polyethylen, Polyamide, Polyurethan usw.) kann der Laserstrahl nur bedingt als Trennwerkzeug eingesetzt werden.

Hinweis

Insbesondere beim Laserschneiden von Kunststoffen können giftige Stoffe freigesetzt werden. Das Schneiden von Kunststoffen mit den Laserschneidmaschinen von TRUMPF ist nicht zulässig!

3.5 Maschinen und Anlagen

Um metergroße, flache Bleche, aber auch dreidimensionale Werkstücke schneiden zu können, braucht der Laserstrahl eine Optik, die ihn bündelt, sowie eine Maschine, die ihn führt und alle nötigen Bewegungen erlaubt. Welches Spektrum an Werkstücken geschnitten werden kann, bestimmt die Ausführung der Maschine oder Anlage.

Bewegungsachsen

Um Konturen zu schneiden, müssen sich Laserstrahl und Werkstück relativ zueinander bewegen. Während der Bearbeitung werden entweder der Schneidkopf oder das Werkstück oder beide bewegt. Je nach Werkstück, flach oder dreidimensional, sind eine oder mehrere Achsen notwendig. Immer stärker setzen sich auch Roboter durch.

1D-Lasermaschinen

1D-Lasermaschinen werden nur für gerade Schnitte benötigt, wie zum Beispiel zum Ablängen von Rohren.

2D-Lasermaschinen (Flachbett-Laserschneidanlagen und Rohrbearbeitungsmaschinen)

Mit 2D-Lasermaschinen werden Konturen aus ebenen Blechtafeln und Rohren geschnitten. Am häufigsten werden Maschinen eingesetzt, bei denen sich der Schneidkopf über das Werkstück bewegt.

3D-Anlagen

3D-Anlagen schneiden z. B. Konturen in dreidimensionale Werkstücke. Dazu muss die Optik mindestens 5 Bewegungsachsen haben, die 3 Raumachsen und zusätzlich eine Dreh- und eine Schwenkachse. In Sonderfällen kann auch das Werkstück bewegt werden.

Rohrschneidanlagen

In Rohrschneidanlagen werden Konturen aus Rohren und Profilen ausgeschnitten. Die Bearbeitungsoptiken haben 2 bis 5 Bewegungsachsen. Zusätzlich wird hier immer das Werkstück bewegt.

Roboter

Roboter als kostengünstige Alternative zur 3D-Anlage sind immer mehr im Kommen. Sie können jedoch auch flache Werkstücke bearbeiten. Die Kombination mit CO₂-Lasern war lange Zeit schwierig, da der Laserstrahl nicht über ein Laserlichtkabel zum Roboter geführt werden kann. Die diffusionsgeköhlten Laser lösen jedoch das Problem. Sie sind kompakt und leicht und werden direkt auf dem Roboterarm platziert. Einen Nachteil haben Roboter jedoch, ihre Genauigkeit ist geringer als die von kartesischen Maschinen.

4. Mit dem Laser kennzeichnen und k﻿rnen

Kennzeichnen Beim Kennzeichnen mit dem Laserstrahl wird die Materialoberfl﻿che geringf﻿gig abgetragen und verf﻿rbt. Diese geringf﻿gige Oberfl﻿chenabtragung ist z. B. nach einer Lackierung des Werkst﻿cks nicht mehr sichtbar.

Mit dem Laser k﻿nnen Baustahl, rostfreier Stahl und Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen unter folgenden Gesichtspunkten gekennzeichnet werden:

- Bearbeitung in allen Blechdicken.
- Bleche mit ölfreier Oberfl﻿che.
- Geringe Laserleistung.
- Fokusslage deutlich über Materialoberfl﻿che.
- Sauerstoff als Schneidgas ergibt eine Verf﻿rbung der Materialoberfl﻿che.
- Stickstoff als Schneidgas bei Baustahl und rostfreien St﻿hlen möglich, bei Aluminium und Aluminiumlegierungen ungeeignet, da der Laserstrahl sehr stark reflektiert wird.

Körnen Beim Körnen wird eine punktförmige Vertiefung in die Materialoberfl﻿che eingebracht. Dies kann auf zwei Arten erfolgen:

- **Kreisförmiges Körnen** – hier werden mit dem Laserstrahl zwei Kreise beschrieben. Bei Baustahl sind das zwei Kreise mit gleichem Durchmesser von 0.6 mm, bei rostfreiem Stahl zwei konzentrische Kreise mit Durchmesser von 0.3 mm und 0.6 mm.
- **Punktförmiges Körnen** bedeutet, dass mit Hilfe eines Rampenzyklus, d. h. mit reduzierter Laserleistung, ein Startloch erzeugt wird.

Körnen ist vorzugsweise bei Baustahl und rostfreiem Stahl möglich. Bei Baustahl wird Sauerstoff, bei rostfreiem Stahl Stickstoff als Schneidgas eingesetzt.

5. Mit dem Laser Oberflächen behandeln

Die Oberfläche eines Werkstoffs "behandeln" bedeutet, die Struktur oder die Zusammensetzung des metallischen Werkstoffs in der Randschicht des Werkstücks zu verändern.

Zu den Verfahren, bei denen die Struktur geändert wird, gehört das martensitische Umwandlungshärten, Umschmelzen, Glasieren und Schockhärten.

Die Zusammensetzung des Werkstoffs kann man durch Hinzufügen von Zusatzwerkstoffen verändern. Das erreicht man durch Verfahren wie Legieren, Beschichten und Dispergieren.

Laserhärten = Martensitisches Umwandlungshärten

Das Laserhärten beruht auf einer reinen Phasenumwandlung und ist in der Materialbearbeitung das wichtigste Verfahren. Dieses Verfahren entspricht dem klassischen martensitischen Umwandlungshärten. Hierbei wird durch Erwärmen des Werkstoffs bis knapp unter die Schmelztemperatur der Kohlenstoff gelöst, der dann in der vorhandenen Eisenstruktur diffundieren kann. Bei einer sehr schnellen Abkühlung des Materials bildet der Kohlenstoff mit dem Eisen eine neue Struktur, die als Martensit bezeichnet wird. Dieses Härteverfahren wird zum Beispiel bei den Biegewerkzeugen verwendet.

Material

Gusseisen und Stähle, deren Kohlenstoffanteil zwischen 0.3 % und 6.67 % liegt, sind zum Härten gut geeignet. Eine besondere Rolle spielt dabei auch das Gefüge des Werkstoffs. Ein feinkörniges Gefüge begünstigt den Prozess, da der Kohlenstoff im Gefüge schneller diffundieren kann. Stähle, die einen größeren Eisenanteil und ein grobkörniges Gefüge besitzen, sind für das Laserhärten weniger geeignet.

Werkstückgeometrie und Materialdicke

Abhängig von der Werkstückgeometrie und Materialdicke müssen einige Punkte berücksichtigt werden:

- Damit die Wärmeabfuhr in das Restmaterial gewährleistet ist, muss genügend Material vorhanden sein, seitlich und in die Tiefe.
- Das Härten scharfer Kanten oder das Härten in der Nähe von Konturbereichen, die Wärmestaus verursachen, ist sehr anspruchsvoll.
- Das Laserhärten ist nahezu verzugsfrei und benötigt keine Aufmaße für spätere Nachbearbeitungen.

Einhärtetiefen

Da beim Laserhärten nur die Randschicht in ihrer Struktur geändert wird, liegen die möglichen Eindhärtetiefen zwischen 0.4 mm bis 1.0 mm. Durch gezielte Wärmestaus kann eine größere Eindhärtetiefe erreicht werden.

5.1 Laserhärten mit CO₂-Laser

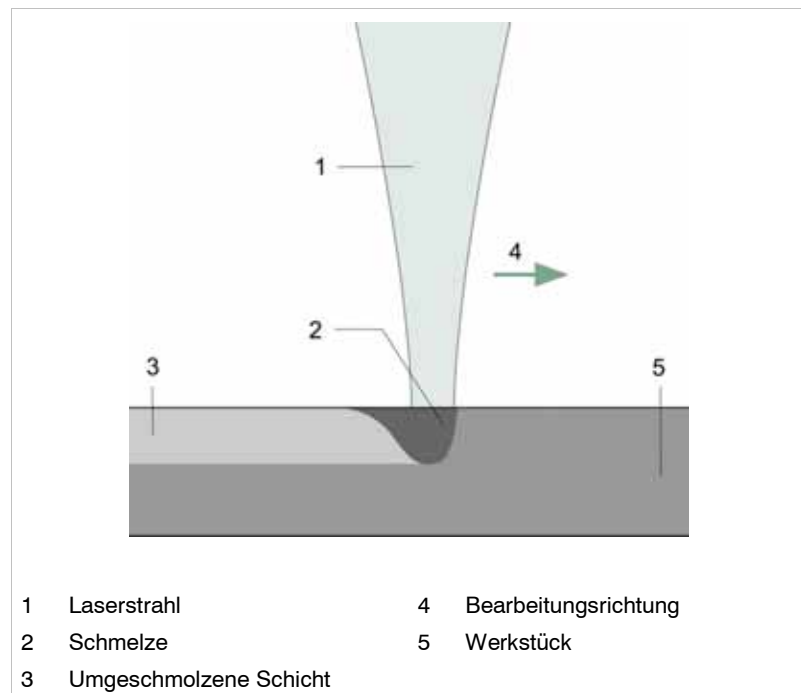
Beim Härten mit dem CO₂-Laser wird das Einkoppeln des Laserstrahls in das Material durch eine gleichmäßig dicke Graphit-Beschichtung gewährleistet. Die Schicht brennt teilweise in die Oberfläche ein und muss eventuell nach dem Prozess entfernt werden. Eine oxidfreie Härtung ist möglich, jedoch wegen der starken Reflexionen des Laserstrahls schwierig und wirtschaftlich ungünstig.

Das Härten mit CO₂-Laser erfolgt entweder durch Einsatz von Facetten-Optik oder mit Hilfe von Scanner-Optik.

- | | |
|-----------------------|--|
| Facetten-Optik | Bei Facetten-Optik wird die Spurbreite durch die Optik festgelegt. Diese Möglichkeit ist besonders zum Härten von flächigen Werkstücken geeignet. |
| Scanner-Optik | Die Scanner-Optik ermöglicht die Spurbreite zu programmieren: Der Scanner-Spiegel wird in Schwingungen versetzt und die Schwingungsamplitude bestimmt die Spurbreite. Zusätzlich kann die Temperatur über ein Pyrometer (Strahlungsthermometer) optimal geregelt werden, denn es ist wichtig, dass in jedem Bereich eine konstante Temperatur vorhanden ist. |

5.2 Umschmelzen

Beim Umschmelzen wird die Oberfläche nicht nur erwärmt, sondern kontinuierlich aufgeschmolzen. Wenn die Schmelze erstarrt, kristallisiert das Metall und bildet ein neues Gefüge. Diese ist gleichmäßiger und feiner als vor der Bearbeitung. Seine Eigenschaften sind verändert. Je nach Werkstoff wird mit diesem Verfahren der Härtegrad oder die Korrosionsbeständigkeit verbessert.



Umschmelzen

Fig. 48051

Eingesetzt wird das Umschmelzen hauptsächlich bei Gussteilen. Ein Beispiel ist die Nockenwelle, die die Motorventile im Fahrzeug steuert.

Umschmelzen mit Zusatzstoff

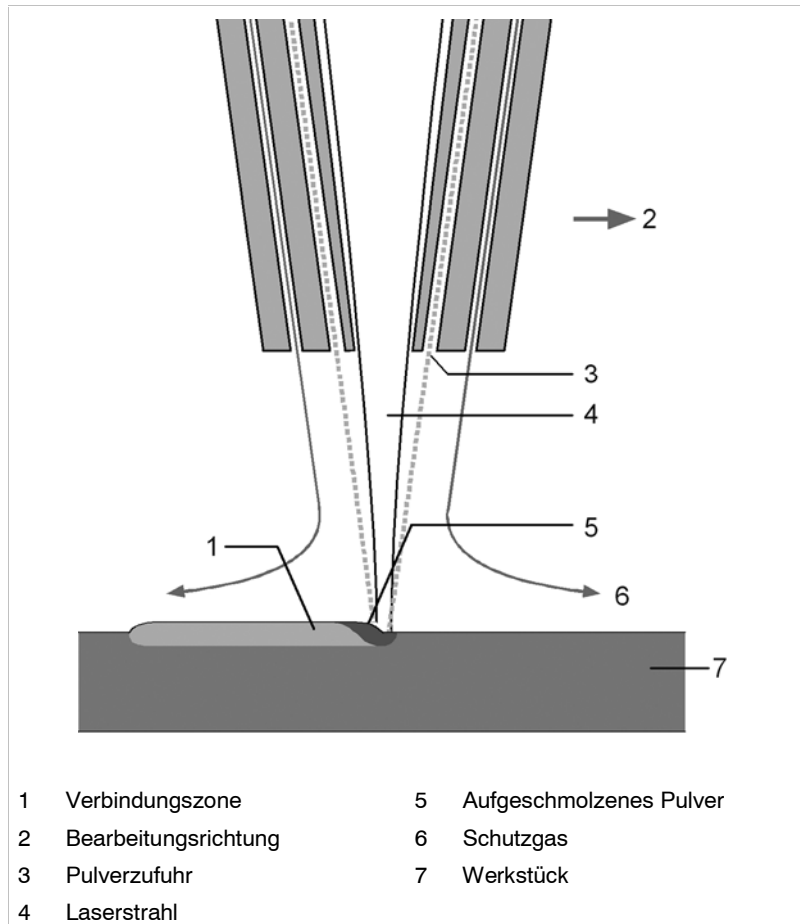
Zusatzstoffe werden in die Schmelze eingebracht und verändern die Eigenschaften der Randschicht. Auf diese Art lassen sich preiswerte Grundwerkstoffe mit hochwertigen Randschichten versehen. Chrom, Nickel und Titan machen die umgeschmolzene Schicht korrosionsbeständiger. Karbide verbessern die Verschleißfestigkeit.

Wenn sich Schmelze und Zusatzwerkstoffe vollständig vermischen, spricht man von Legieren. Wenn hingegen die Zusatzstoffe nur in das Material eingelagert werden, spricht man von Dispergieren.

Laserhärten und Umschmelzen werden vor allem in Spezialfällen angewendet, etwa bei dreidimensionalen Werkzeugen und Teilen, die sich nicht mit anderen Verfahren härten lassen.

5.3 Legieren und Dispergieren

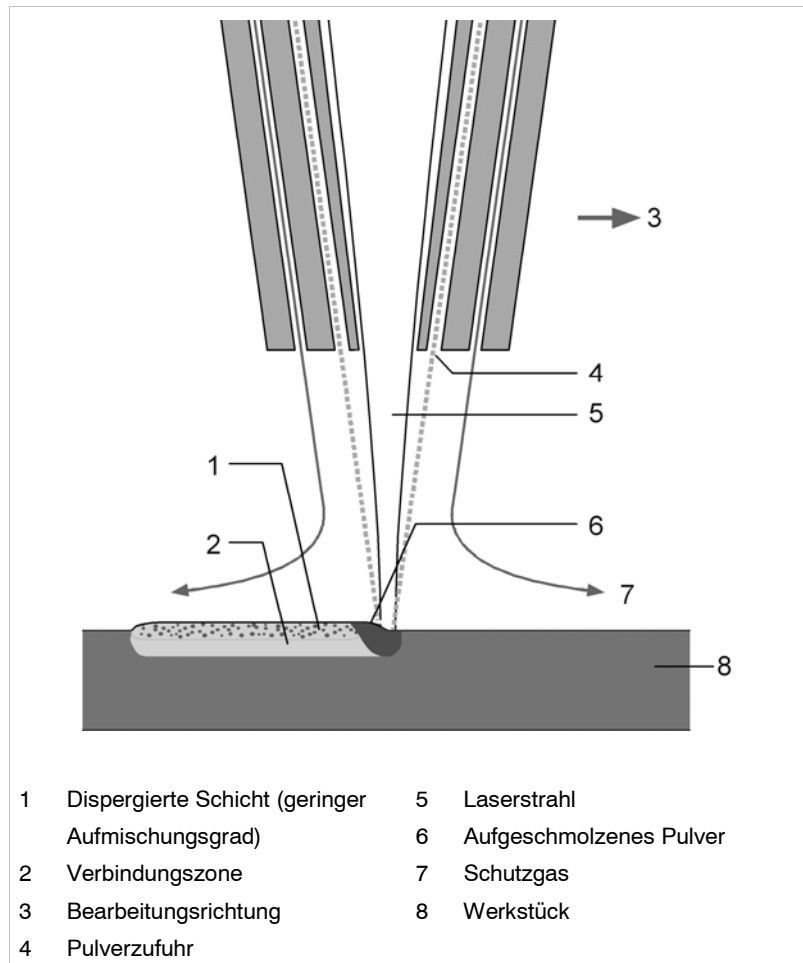
Legieren Beim Legieren wird die Oberfläche mit wenig Energie aufgeschmolzen und ein Zusatzstoff über eine Düse direkt in die Schmelze geleitet. Der Zusatzstoff löst sich in der Schmelze und eine dünne Schicht bildet sich.



Legieren

Fig. 48509

Dispergieren Beim Dispergieren wird im Gegensatz zum Legieren mehr Energie in die Werkstoffoberfläche eingebracht. Es wird mehr Material aufgeschmolzen und wiederum über eine Düse ein Zusatzstoff in die Schmelze geleitet. Der Zusatzstoff löst sich jedoch nicht in der Schmelze, er bildet auf der Oberfläche eine separate, dünne Schicht.



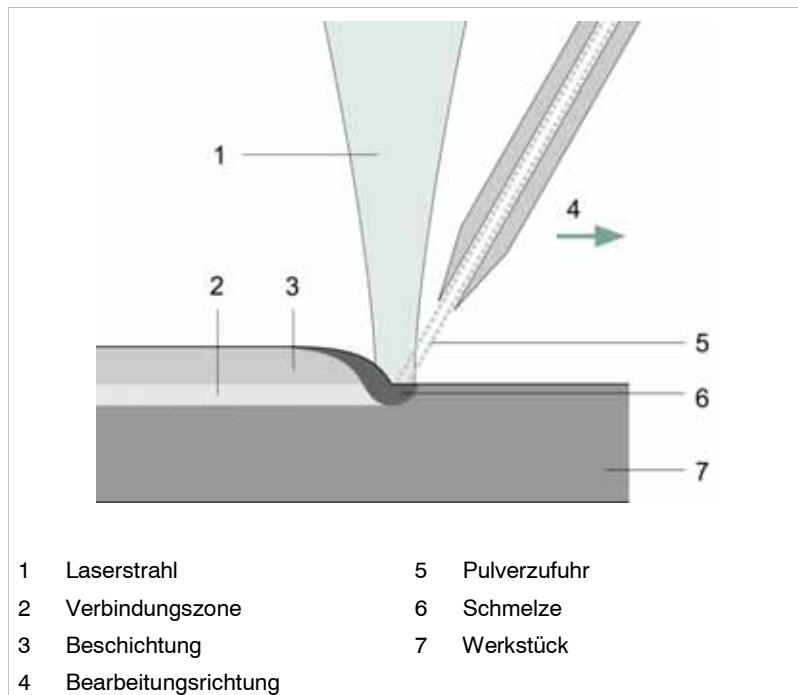
Dispergieren

Fig. 48510

5.4 Beschichten

Beim Beschichten wird vom Laserstrahl ein Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen, der sich mit der Werkstoffoberfläche verbindet. Es bildet sich eine separate Schicht, die zwischen 0,5 und einigen Millimetern dick ist.

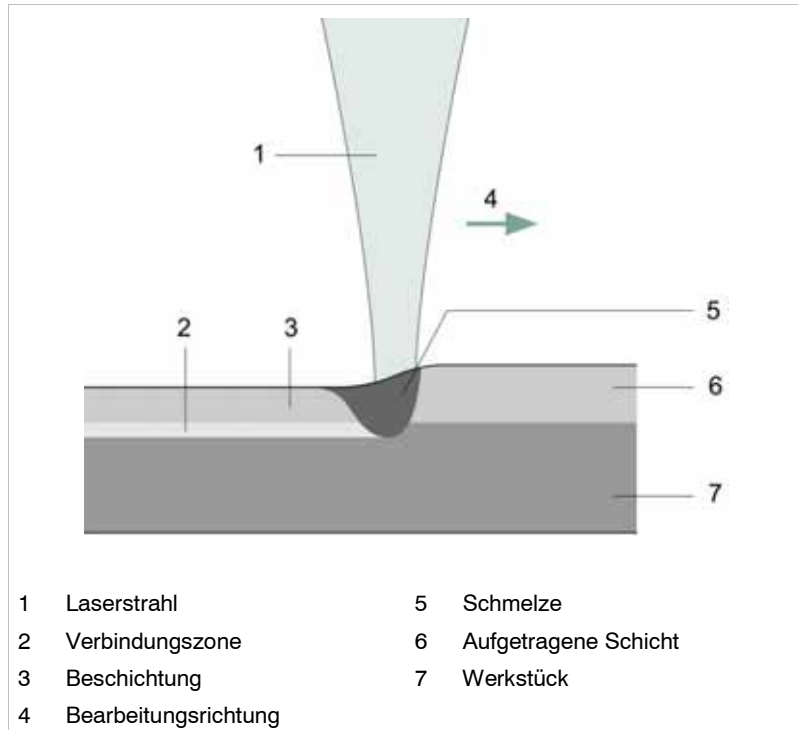
Zugeführt wird der Zusatzstoff auf 2 unterschiedliche Art und Weisen. Die erste: Der Zusatzstoff wird in Pulverform über eine Düse direkt in die Schmelze geleitet - analog dem Direct Metal Deposition (DMD, siehe nächsten Abschnitt).



Einstufiges Laserbeschichten

Fig. 48052

Die zweite: In einem ersten Schritt wird der Zusatzwerkstoff auf die Werkstückoberfläche aufgetragen. Der Laserstrahl verschmilzt die aufgetragene Schicht in einem zweiten Schritt mit dem Grundwerkstoff.



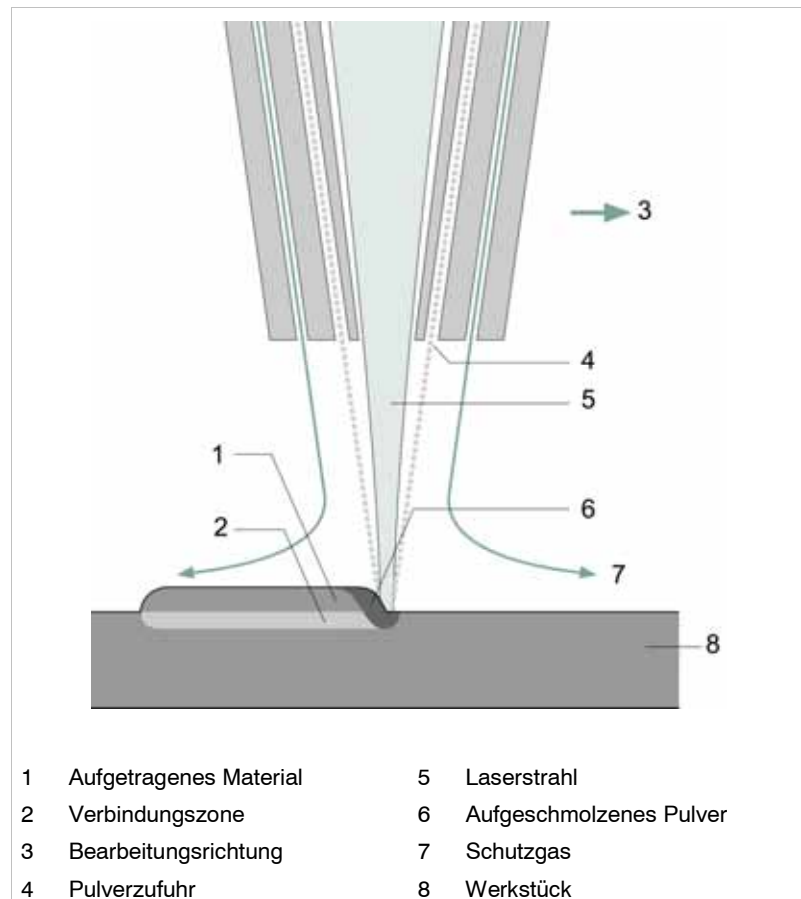
Zweistufiges Laserbeschichten

Fig. 48053

Geeignet ist dieses Verfahren vor allem für das partielle Verändern von Werkstückoberflächen. So bekommen z. B. Motorventile, die stark belastet werden (z. B. Bereich, in dem sie schließen und öffnen) eine Schutzschicht.

6. Direct Metal Deposition (DMD)

Beim Direct Metal Deposition-Verfahren handelt es sich um automatisiertes Auftragsschweißen. Der Laserstrahl erwärmt das Werkstück lokal und erzeugt auf der Werkstückoberfläche ein Schmelzbad. Feines Metallpulver wird coaxial zum Laserstrahl in das Schmelzbad eingesprüht und vollständig aufgeschmolzen. Dabei verbindet es sich mit dem Basismaterial. Die Schichtdicke beträgt 0,2 bis 1 mm. Es können viele Schichten übereinander aufgebaut werden. Als Schutzgas wird meist Argon eingesetzt.



Automatisiertes Auftragsschweißen, DMD

Fig. 48050

Um Linien, Flächen oder Formen aufzutragen, bewegt sich die Bearbeitungsoptik über das Werkstück. Sensoren überwachen die Schichtdicke, indem sie die Ausdehnung des Schmelzbades messen, und können die Energiezufuhr regeln. Die Schicht wird überall gleich dick, da bei Stellen, die häufiger überfahren werden, die Laserleistung reduziert wird.

Eine Vor- und Nachbearbeitung ist auf jeden Fall erforderlich. Bevor das neue Material aufgebaut werden kann, muss die Oberfläche bis zum Basismaterial abgetragen werden. Anschließend wird die im Programmiersystem zuvor definierte Geometrie mit dem Laser grob aufgebaut. Sobald das Werkstück abgekühlt ist, kann die Nacharbeit beginnen, d. h., die alte Form wird durch Fräsen, Drehen, Bohren oder Erodieren wieder hergestellt.

Mit DMD können sowohl flächige Schichten als auch dreidimensionale Formen aufgebaut werden. Grundkörper und aufgetragene Form können aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen, der Grundkörper muss jedoch in jedem Fall aus Metall bestehen. In der Regel können Pulver aus Werkzeugstahl, Edelmetall, Kohlenstoff- oder Nickellegierungen verarbeitet werden.

Aufgrund der hohen Fokussierbarkeit, der damit verbundenen großen Energiedichte sowie der guten Regelbarkeit des Laserstrahls ist der Wärmeeintrag in das Werkstück sehr gering im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren. Durch das komplette Aufschmelzen des Metallpulvers entstehen vollkommen dichte Schichten. Hochfeste und mechanisch belastbare Verbindungen entstehen, bei gleichzeitig geringem Verzug des Grundmaterials.

Einsatzmöglichkeiten

Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig, sowohl im Werkzeug- und Formenbau sowie Maschinen- und Anlagenbau:

- Eigenschaften optimieren, z. B. Spritzgusswerkzeug: Auf einen Werkzeugkörper aus Kupfer, das die Wärme besonders gut ableitet, wird die formgebende Oberfläche aus verschleißfestem Werkzeugstahl aufgetragen. Das reduziert die Zykluszeit beim Spritzgießen und erhöht gleichzeitig die Standzeit des Werkzeuges.
- Bestehende Werkzeuge modifizieren: Bei einer Designänderung wird kein neues Werkzeug hergestellt, sondern lediglich der betroffene Bereich verändert.
- Beschädigte Maschinenkomponenten reparieren.
- Korrosionsschutzschichten für den Chemie- und Anlagenbau auftragen.

Maschine

Eingesetzt werden koordinatengeführte 5-Achs-Laseranlagen, die die Form programmgesteuert aus 3D-Daten aufbauen. Das Werkstück steht meist fest, und die Bearbeitungsoptik hat 5 Bewegungsachsen. Mehrere programmierbare Pulverförderer halten unterschiedliche Metallpulver bereit. Damit können verschiedene Materialsichten aufgetragen werden.



Kapitel 6

Schneidbearbeitung von Rohren und Profilen

| | | |
|-----------|---|-------------|
| 1. | Rohre und Profile | 6-3 |
| 1.1 | Definitionen | 6-3 |
| 1.2 | Welche Querschnittsformen können mit dem Laser bearbeitet werden? | 6-3 |
| 1.3 | Qualität | 6-5 |
| 1.4 | Möglichkeiten und Grenzen bei der Rohrbearbeitung mit 2D- und 3D-Maschinen | 6-6 |
| 2. | Gekrümmte Flächen bearbeiten | 6-9 |
| 2.1 | Konturen polygonalisieren..... | 6-9 |
| 2.2 | Konturen "in der Ebene" bearbeiten | 6-11 |
| 2.3 | Abstandsregelung | 6-12 |
| 2.4 | Schneidabstand bei Rundrohren | 6-13 |
| 2.5 | Eckenbearbeitung bei Mehrkantrohren..... | 6-14 |
| | Schneidabstand korrigieren | 6-14 |
| | Vorschub reduzieren..... | 6-16 |
| 3. | Beeinflussung der Gegenseite | 6-17 |

4. Rohrteile freischneiden 6-18

1. Rohre und Profile

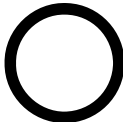
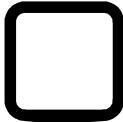



1.1 Definitionen

- Rohr** Zweiseitig offener Hohlkörper, dessen Länge größer als das zweifache des Außendurchmessers ist. Zur näheren Bezeichnung wird nach der Querschnittsform des Rohres unterschieden, z. B. Rundrohr, Rechteckrohr, Sechskantrohr usw.
- Profil** Allgemeine Benennung eines Querschnittes beliebiger Form aus beliebigem Werkstoff.

1.2 Welche Querschnittsformen können mit dem Laser bearbeitet werden?

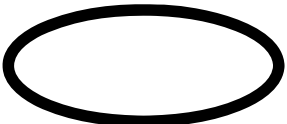
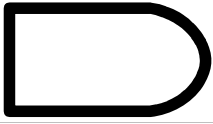

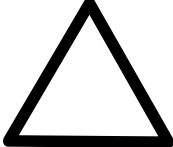
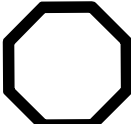
Rohre mit den unterschiedlichsten Querschnittsformen können bei Einsatz der geeigneten Spanntechnik mit dem Laser bearbeitet werden.

Beispiele für Standard-Querschnittsformen

| | |
|---------------|---|
| Rundrohr |  |
| Quadratrohr |  |
| Rechteckrohr |  |
| Rundovalrohr |  |
| Flachovalrohr |  |

Tab. 6-1

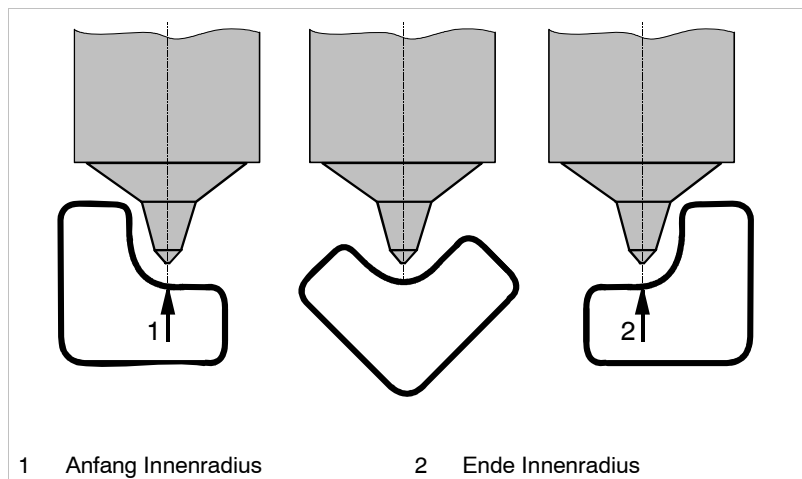
Beispiele für Sonder-Querschnittsformen

| | |
|-----------------------|---|
| Ellipsenförmiges Rohr |  |
| Halbovalrohr |  |
| D-Rohr |  |
| Dreikantrohr |  |
| Achtkantrohr |  |

Tab. 6-2

Profile mit Innenradien

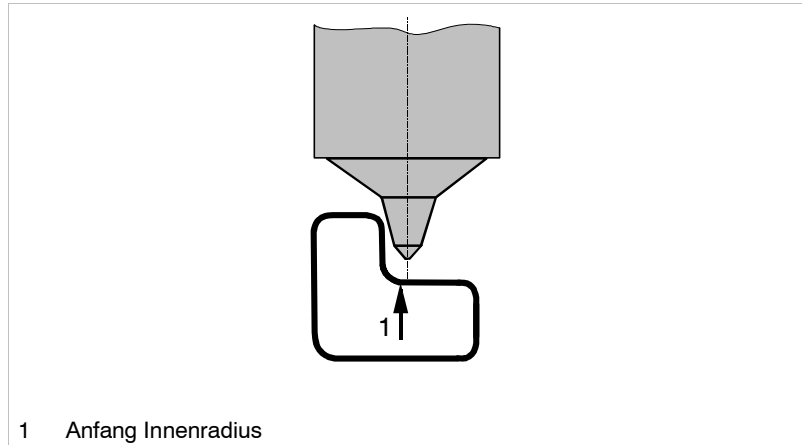
Profile mit großen Innenradien können bearbeitet werden, indem das Profil unter dem Schneidkopf während der Bearbeitung um 90° gedreht wird.



Profil mit großem Innenradius

Fig. 21147

Grundsätzlich gibt es jedoch für die Bearbeitung von Profilen mit Innenradien Einschränkungen. Abhängig von der Geometrie des Laserschneidkopfs und der Schneiddüse kann es bei der Bearbeitung von Profilen mit kleinen Innenradien zur Kollision des Schneidkopfs mit dem Werkstück kommen.



1 Anfang Innenradius

Fig. 21148

Das in Fig. 21148 dargestellte Profil mit kleinem Innenradius kann nicht bearbeitet werden, da der Schneidkopf und das Werkstück bereits kollidieren, bevor das Profil für die Bearbeitung des Innenradius gedreht werden kann.

1.3 Qualität

Die Ausgangsqualität des zu bearbeitenden Rohres ist von entscheidender Bedeutung für die erzielbare Genauigkeit der Konturen auf dem Werkstück. Die Qualität eines Rohres wird bestimmt durch:

- Geradheitsabweichungen.
- Durchmesserabweichungen.
- Wanddickenabweichungen.
- Verdrehung (Torsion).
- Verwindungssteifigkeit.
- Herstellverfahren (geschweißt oder gezogen).
- Oberflächengüte (Rauigkeit, Korrosion).
- Konstanz der Eckenradien (Schwankungen innerhalb einer Charge).

Beurteilung von Laserschnitten auf Rohren

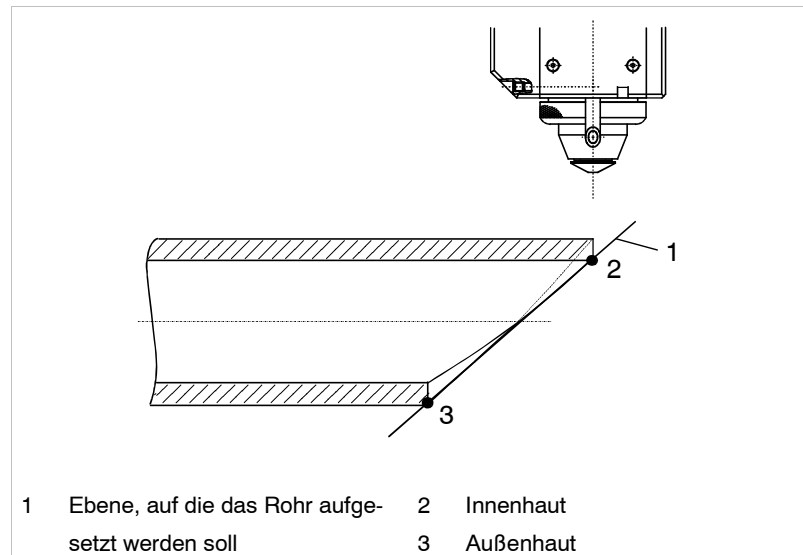
Grundsätzlich kann für die Qualitätsbeurteilung von Laserschnitten auf Rohren auf das Kapitel 7 "Kriterien zur Beurteilung von Laserschnitten" zurückgegriffen werden. In diesem sind die einzelnen Kriterien beschrieben. Die Ergebnisse sind größtenteils auf die Rohrbearbeitung übertragbar. Lediglich die Rautiefe ist bei Laserschnitten auf Rohren immer größer als bei Laserschnitten auf ebenen Werkstücken.

1.4 Möglichkeiten und Grenzen bei der Rohrbearbeitung mit 2D- und 3D-Maschinen

Um Ansatsteile (ebene Platten, bearbeitete oder unbearbeitete Rohre) mit der Schnittkante eines Rohrs verbinden zu können, muss das Ansatsteil lückenlos auf der Schnittkante aufliegen.

2D-Rohrschneiden

Beim 2D-Rohrschneiden steht der Laserstrahl in der Regel senkrecht zur Oberfläche des Rohrs, damit sich die Materialdicke während der Bearbeitung nicht ändert. Er wird in einer horizontalen Ebene geführt, während sich das Rohr um seine Längsachse dreht. Dadurch wird die "ideale Schnittlinie" nur an den Stellen erreicht, an denen der Laserstrahl von der Innen- auf die Außenhaut und umgekehrt wechselt.



2D-Bearbeitung: Ebener Schnitt

Fig. 27376

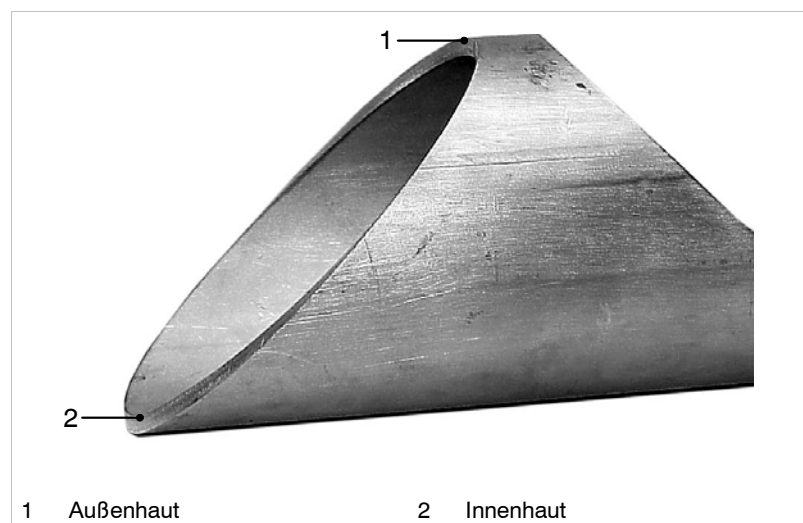
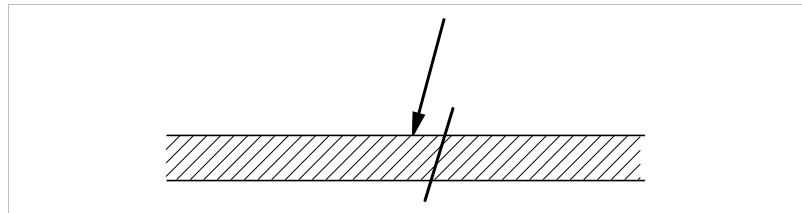


Fig. 27377

Für eine saubere Verbindungsnaht ist es ausreichend, wenn einmal die Außenhaut des Rohrs aufliegt und einmal die Innenhaut. Allerdings nur dann, wenn die Verbindungsnaht über ein konventionelles Schweißverfahren mit Zusatzdraht hergestellt wird.

3D-Rohrschneiden

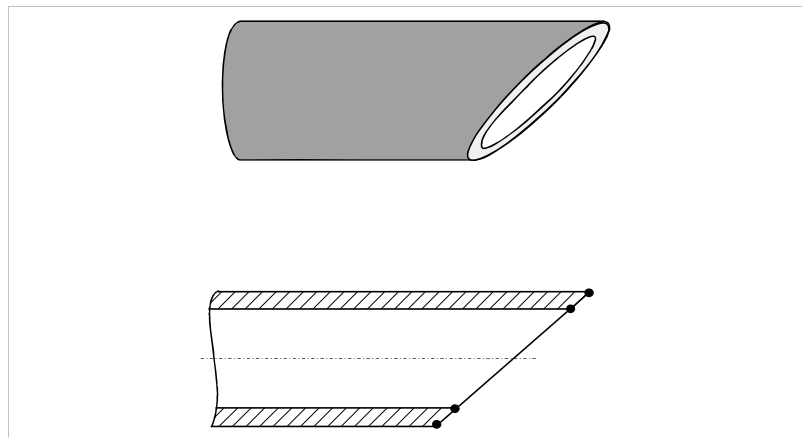
Um eine ideal aufliegende Schnittkante zu erzeugen, die bei einer Verbindung an allen Stellen gleichzeitig mit Außen- und Innenhaut auf dem Anslussteil liegt, muss der Laserstrahl im Anschnittwinkel zum Rohr stehen. Dies ist notwendig, wenn die Schnittkante eines Rohres über ein Laserschweißverfahren mit einem Anslussteil verbunden werden soll.



Strahlführung bei der 3D-Bearbeitung

Fig. 6450

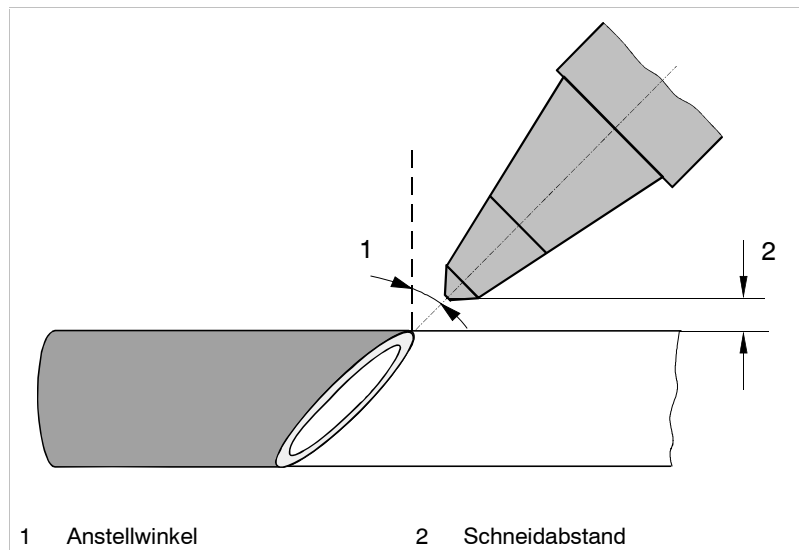
Möglich ist dies nur mit 3D-Maschinen:



3D-Bearbeitung: Ebener Schnitt

Fig. 6449

Allerdings ist ein 3D-Rohrschneiden aus verfahrenstechnischen Gründen nur eingeschränkt möglich. Vergrößert man den Anstellwinkel des Laserstrahls zum Rohr extrem, treten Probleme auf:



Extremer Anstellwinkel bei der 3D-Bearbeitung

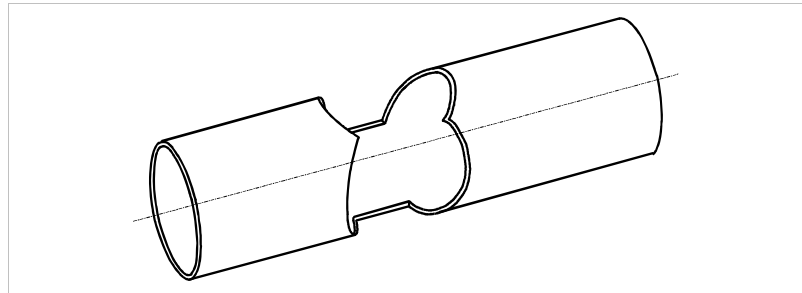
Fig. 21149

- Die Materialdicke verändert sich.
Um trotzdem gute Schneidergebnisse zu erzielen, müssen die Schneidparameter ständig angepasst werden. Zwei Möglichkeiten der Anpassung sind denkbar:
 - Umschalten zwischen mehreren Laser-Technologietabellen, da die Schneidparameter einer Laser-Technologietabelle immer nur für eine Materialdicke optimal sind.
 - Schneidparameter anwählen, die über die gesamte Bearbeitungsstrecke nur geringe Schneidgeschwindigkeiten zulassen.
- Schneidgas wird abgelenkt.
Das ausströmende Schneidgas wird teilweise von der Rohroberfläche abgelenkt und strömt nicht ausschließlich in den Schnittspalt. Beim Sauerstoffschneiden kann dies ein stärkeres Ausbrennen der Schnittkanten und Gratbildung zur Folge haben. Beim Stickstoffschneiden ist Gratbildung möglich, da die Schmelze schlechter aus dem Schnittspalt getrieben wird.
- Schneidabstand stimmt nicht mehr.
Die kapazitive Abstandsregelung ermittelt zu hohe Kapazitäten zwischen Düse und Materialoberfläche. Dies führt zu Abstandsfehlern und Fokusveränderungen, was wiederum unsaubere Schnittkanten verursachen kann.
- Schneidgeschwindigkeit nimmt ab.
Die Schneidgeschwindigkeit muss für die Herstellung schräger Schnitte oftmals extrem reduziert werden.

2. Gekrümmte Flächen bearbeiten

2.1 Konturen polygonalisieren

Bei der Bearbeitung gekrümmter Flächen werden Kurvenzüge auf Rundrohren oder auf Eckenradien bei Mehrkantrohren als Polygonzüge im NC-Text ausgegeben.



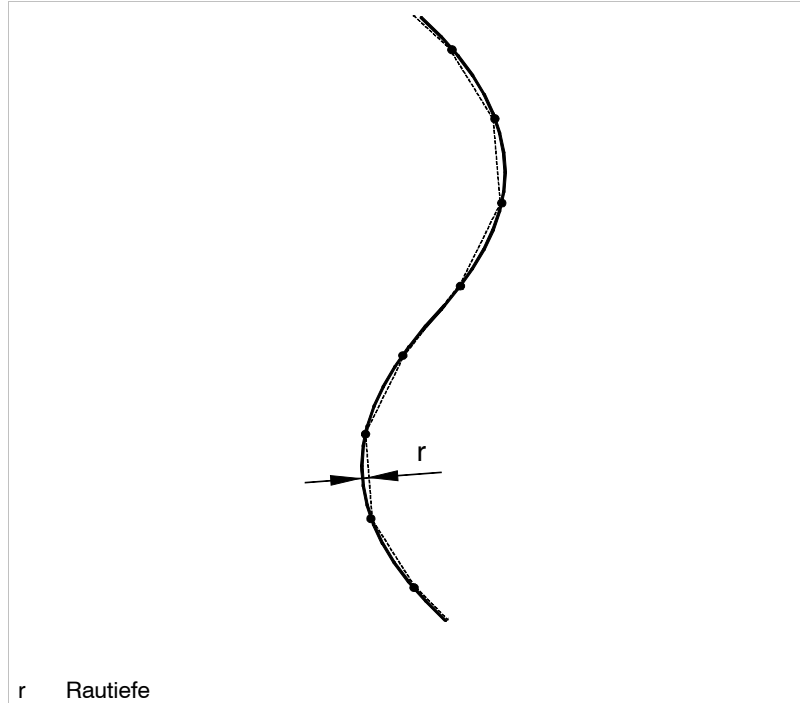
Beliebige Kontur mit Kurvenzügen auf einem Rundrohr

Fig. 20852

Die Polygonzüge bestehen aus mehreren geraden Teilstücken (Inkrementen), wobei die Inkrementlänge von der Krümmung des zu fahrenden Kurvenzugs und der gewählten Konturabweichung abhängt. Die Abarbeitungsgeschwindigkeit bei der Bearbeitung polygonalisierter Konturen kann gesteigert werden, wenn die Übergänge zwischen den einzelnen Inkrementen möglichst tangentiell sind. Nahezu tangentielle Übergänge erhält man, indem man die Inkremente verkleinert, d.h. mehr Punkte für einen Kurvenzug festlegt.

Konturabweichung

Die Konturabweichung ist der maximale Abstand der programmierten Schnittkontur von der Originalkontur. Die Konturabweichung wird im Programmiersystem TruTops Tube als "Rautiefe" bezeichnet. Richtwert für die Rautiefe bei der Bearbeitung von Rundrohren: 0.05 mm.



Konturabweichung (Rautiefe)

Fig. 19936

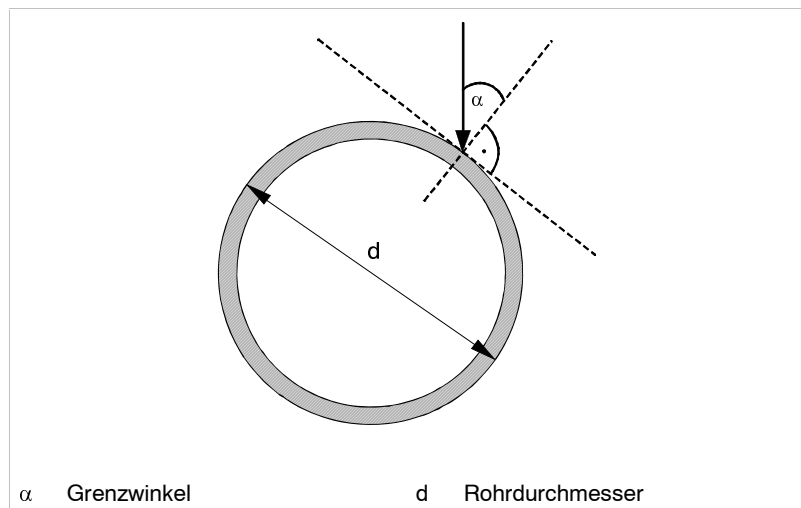
Je geringer der Wert für die Konturabweichung gewählt wird, desto näher liegt die polygonalisierte Kontur an der Originalkontur.

2.2 Konturen "in der Ebene" bearbeiten

Kleine Konturen auf Rundrohren können auch "in der Ebene" bearbeitet werden. Dabei wird die Rundachse während der Bearbeitung nicht gedreht. Programmiert werden die Bewegungen der X- und der Y-Achse. Die Bewegungen der Z-Achse werden von der Abstandsregelung gesteuert.

- Vorteile**
- Originalkontur, kein Polygonzug.
 - Wenige Sätze, geringer Speicherplatzbedarf.
 - Schnelle Abarbeitungsgeschwindigkeit.
 - Parallele Schnittkanten.

Grenzwinkel α Bei der Bearbeitung von Konturen in der Ebene, sollte der Laserstrahl nicht steiler als im Grenzwinkel α zum Rohr stehen (Richtwert: 25°). Bei größeren Schnittwinkeln kommt es zu den bereits auf Seite 8 erläuterten Problemen.



Grenzwinkel α

Fig. 19935

2.3 Abstandsregelung

Im Schneidkopf ist eine Abstandsregelung integriert, die während der Bearbeitung dafür sorgt, dass der Schneidabstand konstant bleibt.

Funktionsprinzip

Die Abstandsregelung ermittelt den Abstand zwischen Schneiddüse und Materialoberfläche (Schneidabstand) kapazitiv. Dabei können Schneiddüse und Materialoberfläche als zwei sich gegenüberliegende Kondensatorplatten aufgefasst werden. Zwischen diesen zwei Kondensatorplatten bildet sich eine Kapazität aus, wobei das Material in einem Radius von ca. 20 mm um die Düsen spitze herum zur Ermittlung dieser Kapazität beiträgt. Die Kapazität verändert sich, wenn sich der Schneidabstand ändert. Setzt man nun immer einen bestimmten Kapazitätswert zu einem bestimmten Wert für den Schneidabstand in Beziehung, entsteht eine Kennlinie.

Ablauf während der Bearbeitung

Der Abstandsregelung wird mit dem Aufruf einer Laser-Technologie tabelle im NC-Programm ein Sollwert für den Schneidabstand vorgegeben. Diesem Sollwert weist die Abstandsregelung anhand einer Kennlinie eine Kapazität zu. Die Z-Achse verfährt daraufhin, bis der Abstand zwischen Düse und Materialoberfläche genau diese Kapazität ausbildet. Während der Bearbeitung misst die Abstandsregelung ständig die Kapazität zwischen Düse und Materialoberfläche und hält den Schneidabstand konstant.

2.4 Schneidabstand bei Rundrohren

Bei der Bearbeitung von Rundrohren muss der Schneidabstand korrigiert werden. Grund dafür ist, dass sich aufgrund der Krümmung des Rundrohrs bei vorgegebener Kapazität zwischen Rohroberfläche und Düse ein geringerer Schneidabstand einstellt. Der tatsächliche Abstand ist also kleiner als der in der Laser-Technologie-tabelle programmierte Wert.

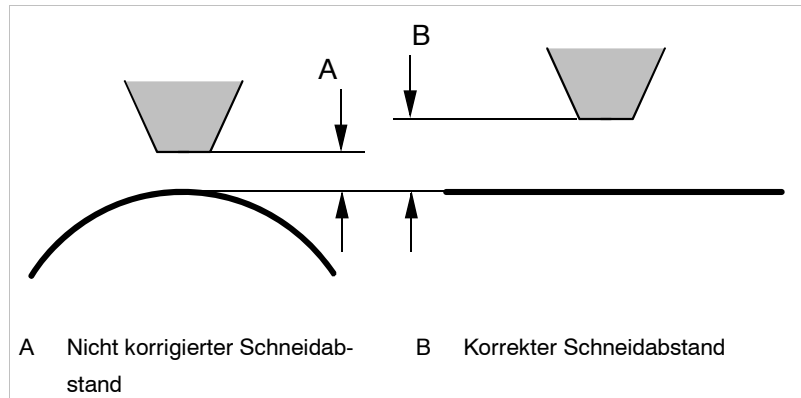


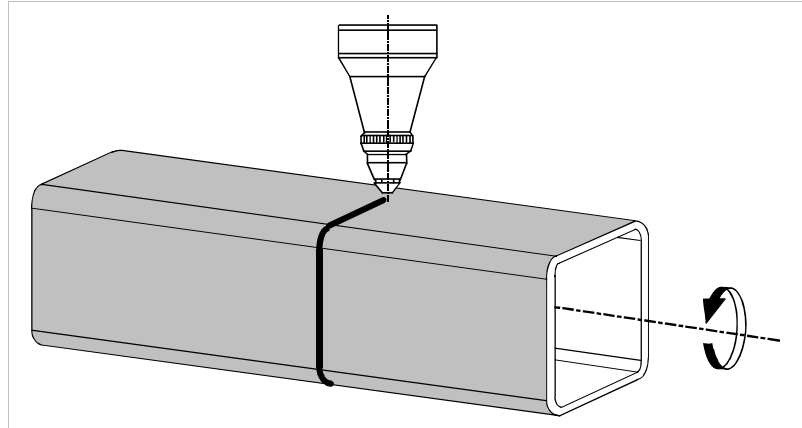
Fig. 20913

Kennlinie auf dem Rundrohr aufnehmen

Bei Rundrohren kann die Kennlinie für die Abstandsregelung direkt auf dem Rohr selbst aufgenommen werden. Das bedeutet, dass im Vergleich zu einer Kennlinie für die Flachbearbeitung demselben Schneidabstand ein geringerer Kapazitätswert zugeordnet wird. Der Schneidabstand während der Bearbeitung des Rundrohrs stimmt folglich trotz der Krümmung wieder mit dem in der Laser-Technologie-tabelle programmierten Wert überein.

2.5 Eckenbearbeitung bei Mehrkantrohren

Bei der Bearbeitung von Mehrkantrohren liegt ein technologischer Schwerpunkt auf der Eckenbearbeitung.



Rechteckrohr: Umfahren von Ecken

Fig. 9417

Abhängig von der Größe des Eckenradius und den Abmaßen der Rohrseiten wird bei der Eckenbearbeitung zum einen der Schneidabstand korrigiert und zum anderen der Vorschub begrenzt.

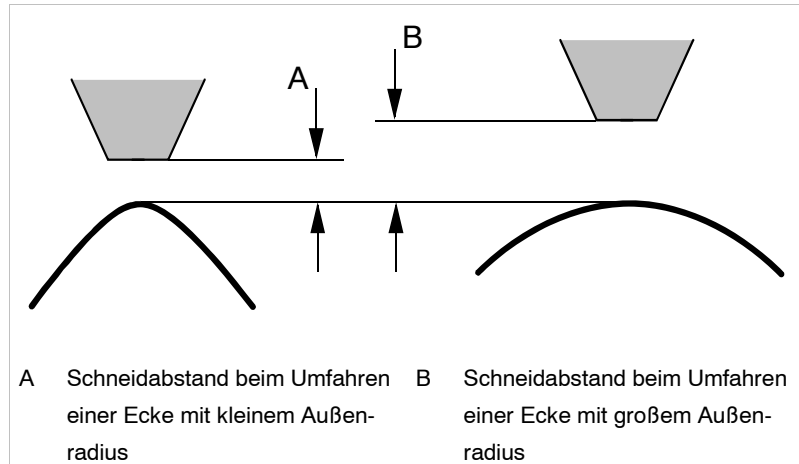
Schneidabstand korrigieren

Die Kennlinie für die Abstandsregelung wird bei Mehrkantrohren in der Mitte der größten ebenen Fläche aufgenommen. Wenn genau in diesem Bereich der ebenen Fläche geschnitten wird, so stimmt der tatsächliche Schneidabstand mit dem programmierten Wert überein. Wenn man in Richtung Eckenradius schneidet, nimmt der tatsächliche Schneidabstand, während sich die Düse noch über der ebenen Fläche des Rohres befindet, ab. Das Material in einem Radius von ca. 20 mm um die Düsenspitze herum trägt zur Ermittlung der Kapazität zwischen Düse und Materialoberfläche bei, woraus die Abstandsregelung den Schneidabstand bestimmt.

Steht die Düse nahe dem Eckenradius, ist im relevanten Bereich unterhalb der Düse nicht überall Material, es stellt sich dadurch ein kleinerer tatsächlicher Schneidabstand ein. Ganz extrem ist die Verringerung des tatsächlichen Schneidabstands, wenn die Schneiddüse über dem Eckenradius des um 45° schräg stehenden Rohres steht. Bei kleinen Eckenradien kollidiert die Düse mit dem Rohr, wenn keine Abstandskorrektur durchgeführt wird.

Schneidabstand bei Außenradien

Je kleiner ein zu umfahrender Außenradius ist, umso kleiner wird der Schneidabstand sein, der sich bei vorgegebener Kapazität zwischen Düse und Materialoberfläche einstellt. Deshalb muss bei der Bearbeitung von Außenradien eine Abstandskorrektur durchgeführt werden, indem ein höherer Wert für den Schneidabstand programmiert wird.

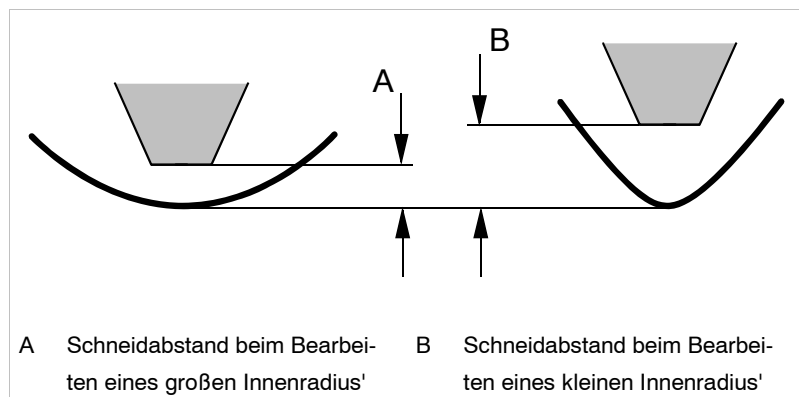


Umfahren von Außenradien ohne Abstandskorrektur

Fig. 21145

Schneidabstand bei Innenradien

Je kleiner ein zu umfahrender Innenradius ist, umso größer wird der Schneidabstand sein, der sich bei vorgegebener Kapazität zwischen Düse und Materialoberfläche einstellt. Deshalb muss bei der Bearbeitung von Innenradien eine Abstandskorrektur durchgeführt werden, indem ein niedrigerer Wert für den Schneidabstand programmiert wird.



Bearbeiten von Innenradien ohne Abstandskorrektur

Fig. 21146

Vorschub reduzieren

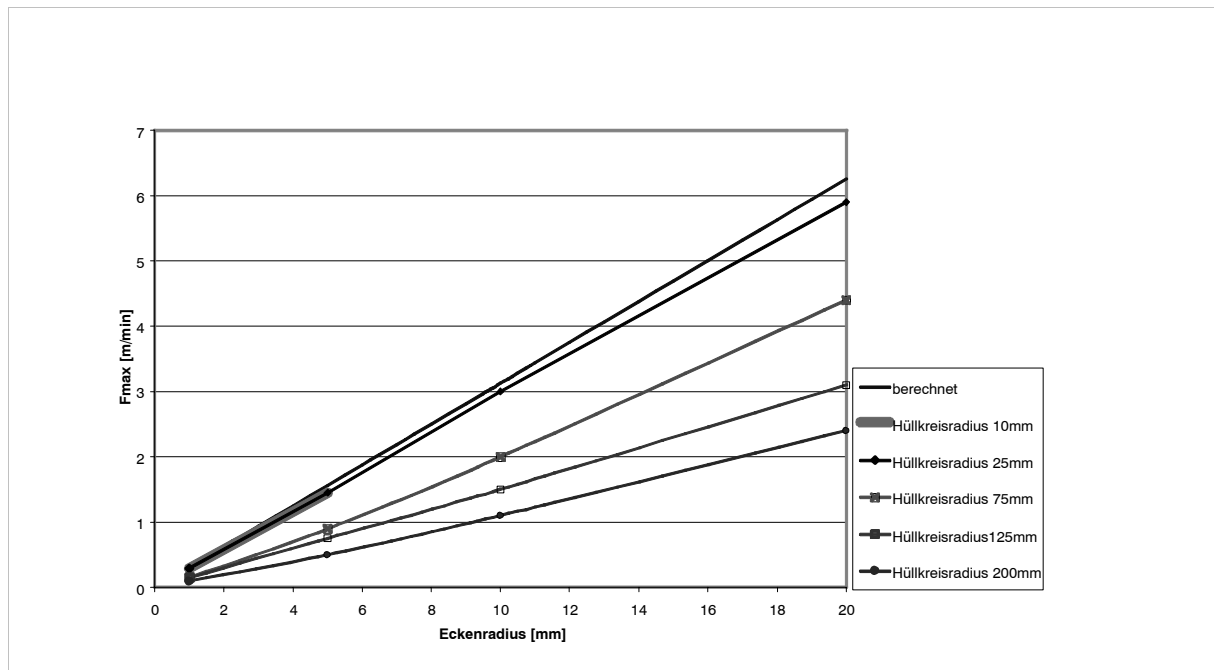
Wie schnell die Ecken eines Mehrkantrohres umfahren werden können, hängt von folgenden Faktoren ab:

- Beschleunigung der Rundachse.

Die konstruktive Auslegung der Rohrbearbeitungsstation beeinflusst die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei der Eckenbearbeitung. Die Rundachse einer TruLaser 3030 mit RotoLas kann zum Beispiel nicht so dynamisch gedreht werden wie die Rundachse der eigens für die Rohrbearbeitung konstruierten TruLaser Tube 5000. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beim Umfahren einer Ecke wird also durch die maximale Rundachsbeschleunigung begrenzt.

- Eckenradius.

Je kleiner der zu umfahrende Eckenradius ist, umso kleiner ist die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei der Eckenbearbeitung.

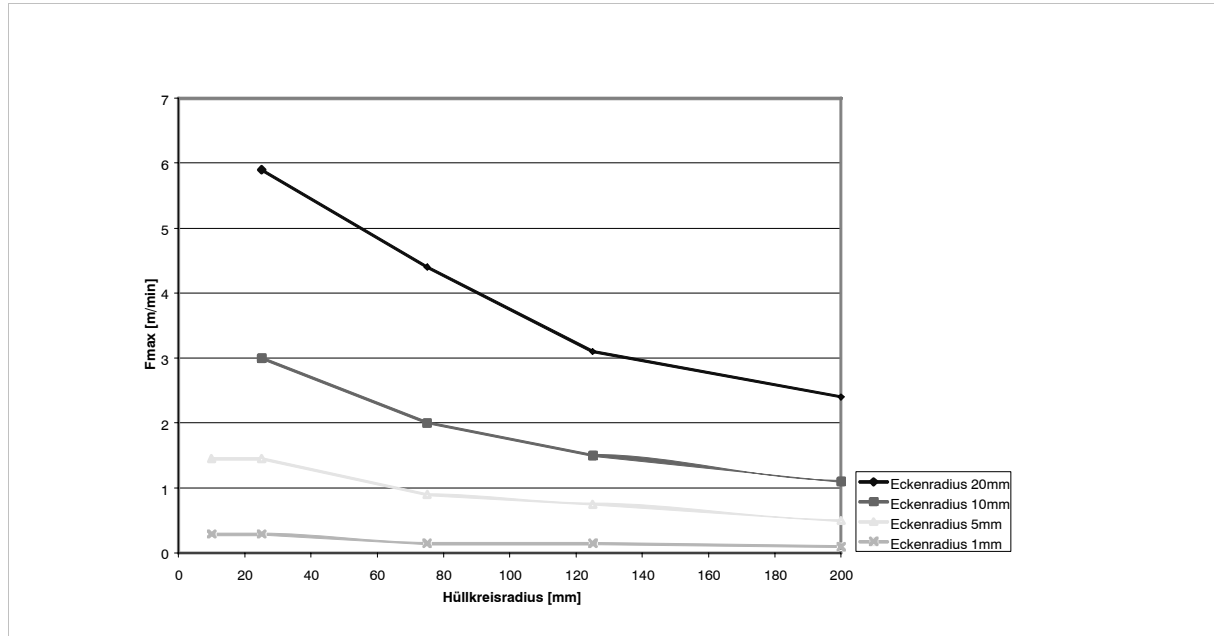


TruLaser 3030 mit RotoLas: Maximale Vorschubgeschwindigkeit bei der Eckenbearbeitung in Abhängigkeit des Eckenradius'

Fig. 20851

- Hüllkreisradius.

Je größer der Hüllkreisradius des Rohres ist, umso kleiner ist die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei der Eckenbearbeitung.



TruLaser 3030 mit RotoLas: Maximale Vorschubgeschwindigkeit bei der Eckenbearbeitung in Abhängigkeit des Hüllkreisradius'

Fig. 19945

3. Beeinflussung der Gegenseite

Im Gegensatz zur Bearbeitung zweidimensionaler Werkstücke besitzt ein Rohr immer eine der Bearbeitung gegenüberliegende Seite. Dies kann zu folgenden Problemen führen:

- Verspritzen der Rohrwand mit Schlacke oder Schmelze.
- Durchschneiden des Rohres auf der gegenüberliegenden Seite.
- Großer Wärmeeintrag und somit starke Überhitzung des Materials.

Diese Probleme treten vor allem bei der Bearbeitung dünnwandiger Rohre mit kleinem Durchmesser bzw. Hüllkreis auf.

Problemlösungen

- Ein Spritzschutz, der während der Bearbeitung in das Rohr eingeführt wird, kann Schlackespritzer "umlenken" und Laserstrahlung absorbieren.
- Einstechen mit reduzierter Laserleistung.
- Schneiden mit reduzierter Laserleistung.

4. Rohrteile freischneiden

Bei der Rohrbearbeitung entsteht ein einzelnes Rohrteil, wenn das bearbeitete Rohrende vom Restrohr freigeschnitten wird. Bei diesem Freischneideprozess können abhängig von der Kontur des Rohrteils Probleme auftreten:

- Das Teil kann sich im Restrohr oder in Abfallteilen verhaken.
- Das Teil kann kippen und mit der Düse des Schneidkopfs kollidieren.

Teil verhakt sich beim Freischneiden

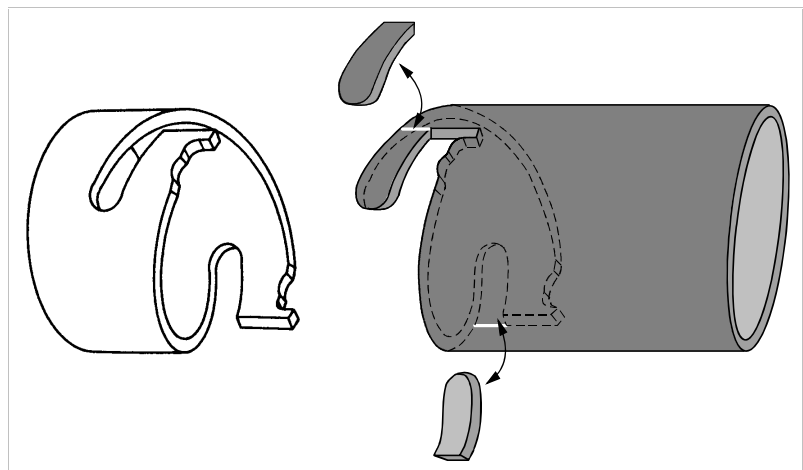
Vor allem Teile, die am Rohrteilende durch die Herstellung einer aufwendigen Kontur mit vielen Einbuchtungen o. ä. freigeschnitten werden, verhaken sich leicht im Restrohr bzw. in Abfallteilen. Ein typisches Beispiel ist die Herstellung eines Bajonettverschlusses:



Bajonettverschluss

Fig. 21179

Die Herstellung des dargestellten Bajonettverschlusses erfordert die Programmierung von Trennschnitten im Abfallteil. Das Abfallteil kann ohne zusätzliche Trennschnitte nicht herausgenommen werden.



Trennschnitte im Abfallteil

Fig. 21150

Teil kippt beim Freischneiden

Teile können beim Freischneiden kippen und mit der Düse des Schneidkopfs kollidieren, wenn die Kontur am freizuschneidenden Rohrende extrem schräg ist.

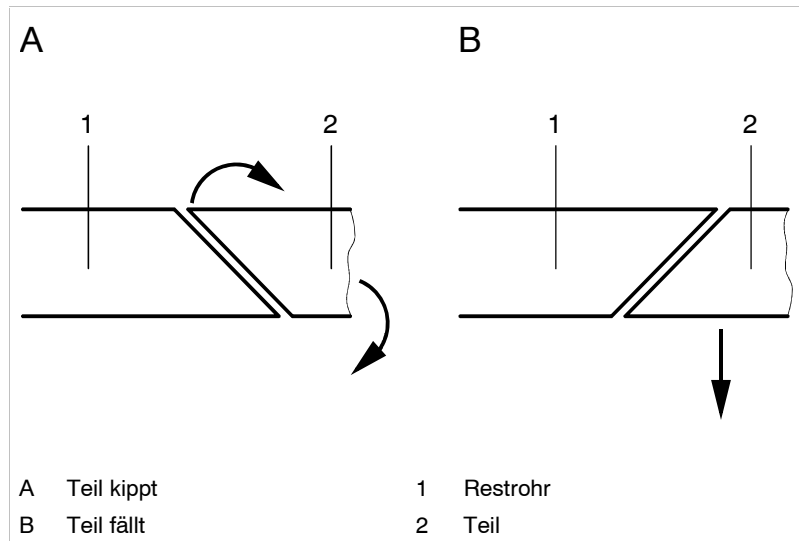


Fig. 20914

Ein Kippen des Teils kann verhindert werden, indem man das Konturende nicht an der langen Seite des Rohrteils programmiert (A) sondern an der kurzen Seite (B).

Ein Spritzschutz, der während der Bearbeitung ins Rohrinne eingeführt wird, verhindert ebenfalls ein Wegkippen des freigeschnittenen Teils.



Kapitel 7

Kriterien zur Beurteilung von Laserschnitten

| | | |
|----|--|------|
| 1. | Wie wird die Schnittqualität beurteilt?..... | 7-2 |
| 2. | Gratbildung..... | 7-3 |
| 3. | Schnittspalt..... | 7-4 |
| 4. | Kolkungen..... | 7-5 |
| 5. | Gemittelte Rautiefe | 7-6 |
| 6. | Rillennachlauf..... | 7-9 |
| 7. | Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz..... | 7-10 |
| 8. | Auswertungstabelle | 7-12 |

1. Wie wird die Schnittqualität beurteilt?

DIN EN ISO 9013 Die DIN EN ISO 9013 ist eine Zusammenfassung und gleichzeitig ein Ersatz der Normen DIN EN ISO 9013:1995-05 "Autogenes Brennschneiden", DIN 2310-4 "Plasmaschneiden" und DIN 2310-5 "Laserschneiden von metallischen Werkstoffen". Zusätzlich wurden die Inhalte dieser Normen überarbeitet.

In der DIN EN ISO 9013 werden Begriffsdefinitionen, Kriterien zur Ermittlung der Qualität von Schnittflächen, die Qualitätseinteilung sowie Maßtoleranzen beschrieben. Sie gilt z. B. bei Laserstrahlschnitten für Materialdicken von 0.5 mm bis 40 mm.

Kriterien bei TRUMPF Bei TRUMPF werden, z. T. abweichend von der DIN EN ISO 9013, zur Beurteilung von Schneidergebnissen folgende Kriterien herangezogen:

- Gratbildung (Bartbildung oder Schmelztropfen).
- Schnittspalt.
- Kolkungen.
- Rillennachlauf n .
- Gemittelte Rautiefe R_{Z5} .
- Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz u .

Eine Definition und Beschreibung der Mess- bzw. Bestimmungsmethoden der oben aufgeführten Kriterien erfolgt auf den nächsten Seiten.

Die Auswertungstabelle am Ende des Kapitels soll Ihnen als Kopiervorlage dienen, um Daten zu sichern, die Sie für eine Beurteilung der Schnittqualität benötigen.

2. Gratbildung

Definition Bei Gratbildung kann es sich handeln um:

- Einen stark anhaftenden, ohne Nachbearbeitung nicht entfernbaren Grat.
- Eine anhaftende, ohne Nachbearbeitung leicht entfernbare Schlacke.

Bestimmung der Gratbildung Die Gratbildung wird visuell beurteilt und mit Worten beschrieben. Das Ausmaß des Grates ist unter anderem von der Fokusslage abhängig.

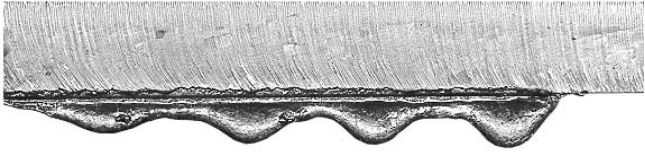
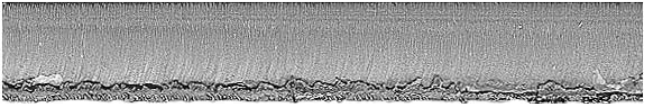
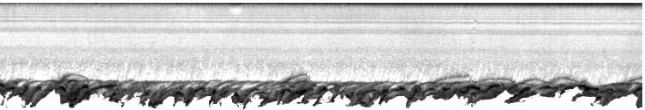
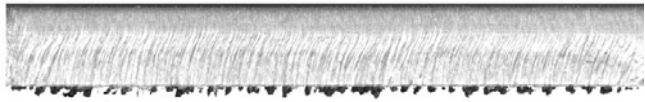
| Art des Grates | Beschreibung | Beispiel |
|----------------|--|--|
| Perlengrat | Perlenartiger oder tropfenartiger Grat, mit metallisch blanker Oberfläche; stark anhaftender Grat. Beispiel: Baustahl, Blechdicke 15 mm Fokusslage +5 |  |
| Krümelgrat | Anhaften von Schmelze als feiner, krümeliger Grat, leichter zu entfernen als der scharfe Grat. Beispiel: Baustahl, Blechdicke 15 mm Fokusslage -1 |  |
| Scharfer Grat | Bartartiger, grob und scharfkantiger Grat; zum Teil stark anhaftend. Die Unterseite der Schnittfläche ist aufgeraut. Beispiel: Edelstahl, Blechdicke 8 mm Fokusslage -4 |  |
| | Feiner, aber scharfkantiger Grat, bartartig an der Unterseite anhaftend. Beispiel: Edelstahl, Blechdicke 8 mm Fokusslage -11 |  |

Fig. 25110, 25111, 25112, 25113

Tab. 7-1

Hinweis

TRUMPF-Richtwerte für Schnittpaltbreiten finden Sie in der Datensammlung zu Ihrer Maschine.

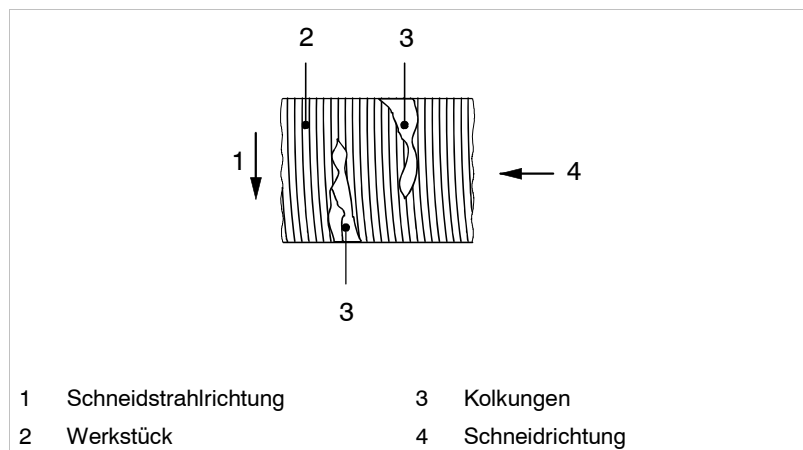
Beispiel 2 Angaben aus der Datensammlung für TruLaser 2525, TruLaser 3030, TruLaser 3040, TruLaser 3060 mit Steuerung SINUMERIK 840D und TruFlow 3000.

| Material | Blechdicke [mm] | Schnittpalt [mm] |
|--|-----------------|------------------|
| Baustahl (QSt 37-2) | 1-3 | 0.15 |
| | 4-6 | 0.2-0.3 |
| | -15 | 0.35-0.4 |
| | 20 | 0.5 |
| Rostfreier Stahl (1.4301), Hochdruckschneiden mit N ₂ | 1-3 | 0.15 |
| | 4-8 | 0.2 |
| | 10-12 | 0.5 |
| Aluminiumlegierungen (AlMg ₃ , AlMgSi ₁), Hochdruckschneiden mit N ₂ | 1-3 | 0.15 |
| | 4-8 | 0.2-0.3 |

Tab. 7-2

4. Kolkungen

Definition Kolkungen sind Auswaschungen unregelmäßiger Breite, Tiefe und Form, die eine sonst gleichmäßige Schnittfläche unterbrechen.

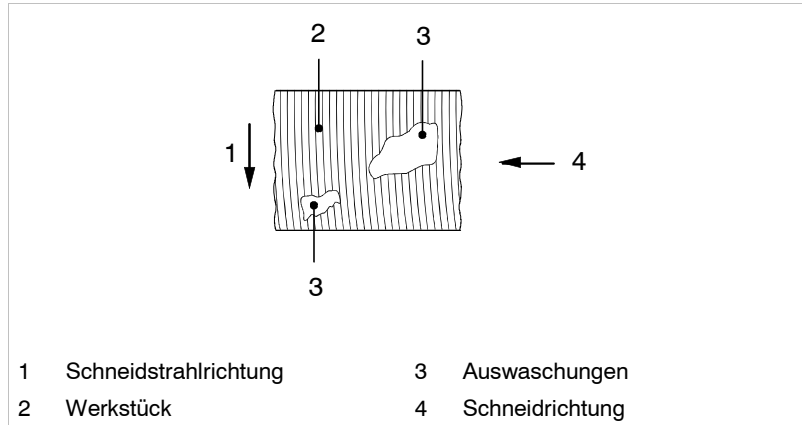


Kolkung

Fig. 25397

Bestimmung Bei der Schnittqualitätsbeurteilung werden vorhandene Kolkungen in ihrer Ausprägung visuell beurteilt und mit Worten beschrieben. Sind keine Kolkungen zu erkennen, wird dieses Kriterium verneint.

Auswaschungen, die z. B. bei Richtungswechsel entstehen, werden gesondert aufgeführt.

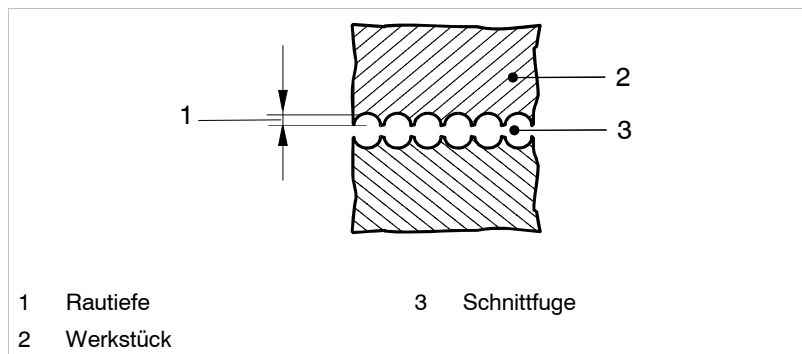


Auswaschung

Fig. 25398

5. Gemittelte Rautiefe

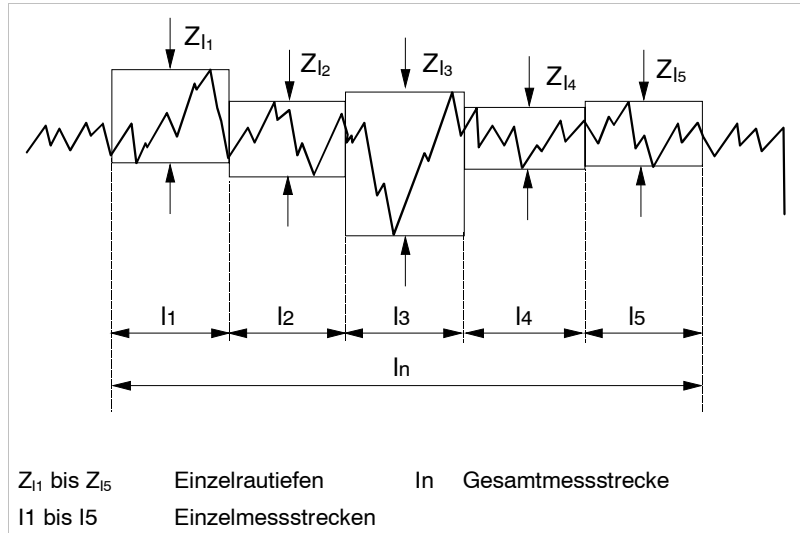
Definition Rautiefe Rautiefe = Rillentiefe



Skizze zu Rautiefe, vergrößerte Draufsicht

Fig. 25246

Die **gemittelte Rautiefe** R_{z5} ist das arithmetische Mittel aus den Einzelrautiefen von fünf aneinandergrenzenden, repräsentativen Einzelmessstrecken. Die Rautiefe wird in $[\mu\text{m}]$ angegeben.



Darstellung: Rautiefe über fünf Einzelmessstrecken

Fig. 25454

Messen der gemittelten Rautiefe R_{z5}

Gemessen wird die gemittelte Rautiefe R_{z5} z. B. mit einem Tastschnittgerät nach ISO 3274. Die Messung selbst erfolgt nach ISO 4288 in kontinuierlichem Abstand in Schneidrichtung.

Der Messort der Rautiefe ist abhängig von der Blechdicke s und der Materialart. Abweichend zur Norm werden bei TRUMPF die Stellen zur Messung herangezogen, die visuell zunächst die höchste Rautiefe aufzeigen. Die Norm sieht den Messort im oberen Drittel von der Schnitt-Oberkante vor.

Die folgende Tabelle gibt den **Messort der Rautiefe** an, abhängig von Blechdicke und Materialart. Diese Werte sind, vom heutigen technischen Stand betrachtet, als Richtwerte zu sehen. Sie wurden mit einem TruFlow 4000 ermittelt.

| Blechdicke s [mm] | Messort [mm] Baustahl | Messort [mm] Edelstahl | Messort [mm] Aluminium |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | -0.5 | -0.5 | -0.5 |
| 2 | -1 | -1 | -1 |
| 3 | -2 | -1 | -2 |
| 4 | -2.6 | -2.6 | -2.6 |
| 5 | -3.3 | -1.6 | -3.3 |
| 6 | -4 | -4 | -4 |
| 8 | -5.3 | -7 | -5.3 |
| 10 | -1 | -9 | - |
| 12 | -1 | -11 | - |
| 15 | -1 | - | - |
| 20 | -1 | - | - |

Tab. 7-3



Hinweis

Das Maximum der Rautiefe wandert bei Baustahl > 8 mm Blechdicke von der Blechunterseite zur Blechoberseite. Bei Edelstahl und Aluminium ist dies nicht zu beobachten.

Richtwerte für gemittelte Rautiefe R_z

In der folgenden Tabelle finden Sie Maximalwerte für gemittelte Rautiefen zu Ihrer Orientierung. Diese Werte wurden bei TRUMPF mit einem TruFlow 4000 ermittelt.

| Blechdicke s [mm] | Baustahl Maximalwerte R_z [µm] | Edelstahl Maximalwerte R_z [µm] | Aluminium Maximalwerte R_z [µm] |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 9 | 6 | 18 |
| 1.5 | 8 | - | 13 |
| 2 | 15 | 10 | 17 |
| 2.5 | 7 | - | 14 |
| 3 | 17 | 10 | 22 |
| 4 | 5 | 10 | 20 |
| 5 | 6 | 10 | 19 |
| 6 | 6 | 13 | 14 |
| 8 | 7 | 19 | 46 |
| 10 | 28 | 43 | - |
| 12 | 23 | 38 | - |
| 15 | 28 | - | - |
| 20 | 28 | - | - |

Tab. 7-4

Hinweis

Diese Werte sind Richtwerte, die mit dem heutigen Stand der Technik ermittelt wurden.

Kolkungen

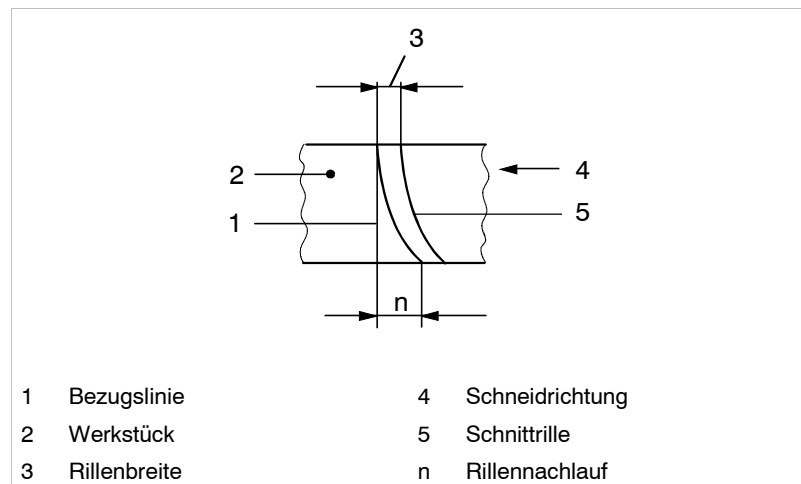
Kolkungen müssen gesondert erfasst werden, da diese durch eine Messung der Rautiefe nicht erfasst werden können. Die Ausdehnungen der Kolkungen übersteigen den Messbereich der Messgeräte.

6. Rillennachlauf

Definition Beim Laserschneiden erhält die Schnittkante ein typisches Rillenmuster. Bei einer geringen Schneidgeschwindigkeit verlaufen diese Rillen nahezu parallel zum Laserstrahl. Je größer die Schneidgeschwindigkeit ist, umso stärker knicken die Rillen entgegen der Schneidrichtung um. Als Rillennachlauf n bezeichnet man den größten Abstand zwischen zwei Schnittrillen in Schneidrichtung.

Messen von n Der Rillennachlauf wird visuell beurteilt.

Das Beurteilen erfolgt anhand eines Fotos oder am Schnittmuster mit Hilfe einer Lupe oder einem Stereomikroskop. Eine Bezugslinie dient als Hilfslinie.



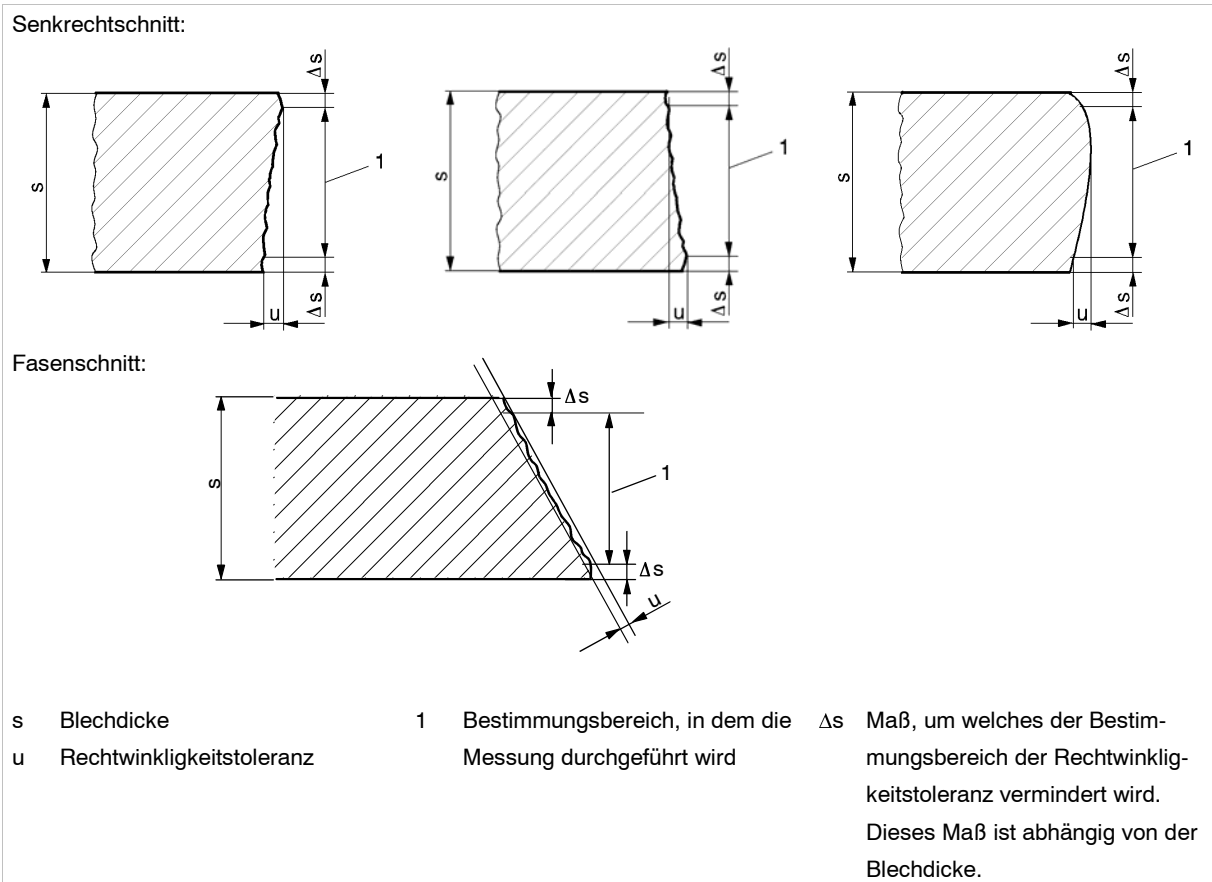
Rillennachlauf messen

Fig. 25399

7. Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz

Definition Die Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz u ist der Abstand zweier paralleler Geraden zwischen denen das Schnittflächenprofil unter dem theoretisch richtigen Winkel - bei Senkrechtschnitten also unter 90° - liegen muss. In der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz ist sowohl die Geradheits- als auch die Ebenheitsabweichung enthalten.

Die Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz wird bei Senkrechtschnitten oder bei Fasenschnitten in [mm] gemessen.



Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz

Fig. 3800, 11181, 11182, 25243

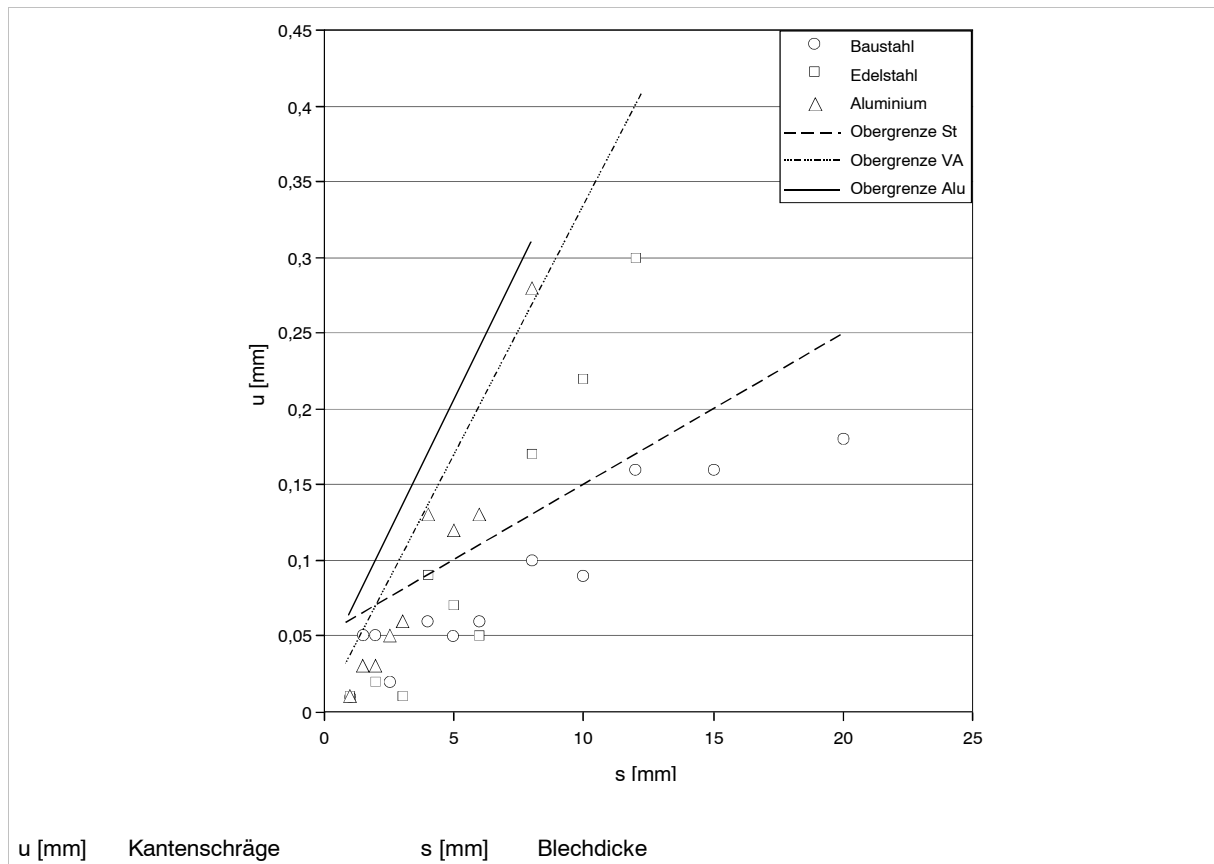
In der DIN EN ISO 9013 werden für das Schneiden mit dem Laser drei Bereiche angegeben: Bereich 1 bis 3.

Abweichend von der Norm werden bei TRUMPF die Bereiche, abhängig vom Material, durch folgende Formeln definiert:

| | Formel für Obergrenze (s = Blechdicke) | |
|---------------------------------|--|--|
| Baustahl (Brennschneiden) | $u = 0.05 + 0.01 s$ | |
| Edelstahl (Schmelzschnitten) | $u = 0.005 + 0.033 s$ | |
| Aluminium (Schmelzschnitten) | $u = 0.03 + 0.035 s$ | |

Tab. 7-5

Bei TRUMPF wurden Werte ermittelt mit der TruLaser 3030 und dem TruFlow 4000. Die Werte sind in folgendem Diagramm dargestellt:



Kantenschrägen bei Bau-, Edelstahl und Aluminium

Fig. 25393

8. Auswertungstabelle

Allgemeine Daten

| | |
|------------------|-------------------------|
| Datum: | Sachbearbeiter: |
| Materialart: | Schneidgeschwindigkeit: |
| Lasertyp: | Linse: |
| Laserleistung: | Fokuslage: |
| Tastfrequenz: | Düsengeometrie: |
| Schneidgasdruck: | Düsenabstand: |
| Schneidgas: | |

Tab. 7-6

Ermittelte Daten

| Material- dicke [mm] | Schnitt- spalt [mm] | Rautiefe [μm] | Rillennach- lauf (ja/nein, gering/ stark) | Recht- winklig- keits- toleranz [mm] | Kolkungen (ja/nein, vereinzelt/ häufig) | Auswa- schungen nach Rich- tungs- wechsel (ja/nein) | Ist-Radius nach 90° Richtungs- wechsel [mm] | Sonstiges |
|-------------------------|------------------------|-------------------------------|---|--|--|--|---|-----------|
| | | | | | | | | |
| Anmerkungen: | | | | | | | | |

Tab. 7-7

Glossar

Absorption

(= lat. Aufnahme) Meint in der Materialbearbeitung mit dem Laser die Aufnahme von Laserlicht durch das Werkstück. Der Absorptionsgrad gibt an, wie viel Laserlicht das Werkstück aufnimmt. Bei gleicher Wellenlänge variiert er von Werkstoff zu Werkstoff. Umgekehrt gilt: Werkstoffe zeigen verschiedene Absorptionsgrade für unterschiedliche Wellenlängen. Darüber hinaus hängt der Absorptionsgrad vom Auftreffwinkel, der Temperatur, dem Aggregatzustand und der Oberflächenbeschaffenheit des Werkstoffs ab.

Abtragen

Verfahren, das zum Beschriften und zum Erzeugen von Vertiefungen eingesetzt wird. Der Laserstrahl trägt den Grundwerkstoff oder eine Deckschicht ab.

Aktives Medium

Die Substanz in der Strahlquelle, die das Laserlicht aussendet. Grundsätzlich kommen viele verschiedene Substanzen als aktives Medium für einen Laser in Frage: Gase, Festkörper wie Kristalle oder Halbleiter sowie Flüssigkeiten. In der Materialbearbeitung werden vor allem CO₂-Gasgemische, dotierte Kristalle oder Gläser und Halbleiter eingesetzt.

Arbeitsabstand

Abstand zwischen dem Gehäuse der Bearbeitungsoptik und dem Werkstück. Variiert von Verfahren zu Verfahren. Beim Schmelzschnitten beträgt der Abstand nur 1 bis 2 Millimeter, damit das Schneidgas in den Schnittspalt strömt.

Arbeitsgas

Gas, das eingesetzt wird, um den Bearbeitungsprozess zu beeinflussen. Beim Schmelzschnitten treibt das Arbeitsgas die Schmelze aus der Schnittfuge. Beim Schweißen mit dem CO₂-Laser verhindert es, dass sich eine Plasmawolke bildet.

Auftragsschweißen

Beim Laser-Auftragsschweißen wird Zusatzwerkstoff in Draht- oder Pulverform aufgeschmolzen und auf die Werkstückoberfläche aufgebracht. Man unterscheidet das manuelle

Auftragsschweißen und das automatische Auftragsschweißen – auch Direct Metal Deposition genannt.

Bearbeitungsoptik

Die Bearbeitungsoptik fokussiert den Laserstrahl durch Spiegel oder Linsen. Sie enthält außerdem Schnittstellen zur Maschine, zum Beispiel für Sensoren, und kann Zusatzstoffe und -gase zuführen. Bearbeitungsoptiken können ganz unterschiedlich aufgebaut sein und sind meist auf ein Verfahren spezialisiert.

Beschichten

Verfahren, um Werkstücke korrosionsbeständiger oder verschleißfester zu machen. Der Laser schmilzt den Zusatzwerkstoff und trägt eine Schicht auf die Werkstückoberfläche auf. Der Zusatzwerkstoff wird entweder während der Bearbeitung als Pulver zugeführt oder zuvor als Schicht auf das Werkstück aufgetragen.

Beschriften

Erzeugen von Markierungen mit dem Laserstrahl. Dafür kommen unterschiedliche Verfahren in Frage: Gravieren, Abtragen einer Deckschicht, Verfärben von Kunststoffen, Anlassbeschriftungen von Stahl und Titan, Aufschäumen von Kunststoffen.

Brennschneiden

Trennverfahren für Baustahl. Der Laserstrahl erwärmt das Metall so stark, dass es mit dem Arbeitsgas Sauerstoff reagiert und verbrennt (Oxidation). Die chemische Reaktion setzt sehr viel Energie frei. Diese unterstützt den Schneidprozess.

Brennweite

Kenngroße einer Fokussierlinse oder eines Fokussierspiegels. Die Brennweite gibt die Entfernung von der Linsen- oder Spiegelhauptebene zum Brennpunkt eines idealen, fokussierten Parallelstrahls an. Allgemein gilt: Je kleiner die Brennweite, desto stärker wird der Laserstrahl fokussiert und desto kleiner ist der Fokusedurchmesser.

CO₂-Gaslaser

Gängiger Lasertyp für die Materialbearbeitung. Das Laserlicht entsteht in einem Gasgemisch

aus Kohlendioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) und Helium (He). Das CO_2 -Molekül erzeugt das Laserlicht. Stickstoff und Helium dienen als Hilfsgase. Die Wellenlänge der CO_2 -Laser liegt mit 10,6 Mikrometern im fernen Infrarot.

Crossjet

Gasstrom, der die Bearbeitungsoptik vor Spritzern schützt, die während der Bearbeitung entstehen. Crossjets werden zum Beispiel beim Schweißen und Bohren eingesetzt.

Dauerstrichbetrieb

(cw-Betrieb) Betriebsart einer Strahlquelle: Im Gegensatz zum Pulsbetrieb wird das aktive Medium kontinuierlich angeregt und erzeugt einen zeitlich gesehen ununterbrochenen Laserstrahl.

Diodenlaser

Lasertyp, der Halbleiter als aktives Medium nutzt. Das Laserlicht entsteht bei der Rekombination von Elektronen und Löchern am Übergang zwischen einer n- und einer p-dotierten Halbleiterschicht. Die Wellenlänge eines Diodenlasers hängt vor allem von der Zusammensetzung des Halbleiters ab und reicht vom sichtbaren bis zum infraroten Licht.

Direct Metall Deposition (DMD)

Automatisiertes Auftragschweißen. Der Laserstrahl schmilzt einen pulverförmigen Zusatzwerkstoff und trägt so Schichten und Formen auf die Oberfläche eines Werkstücks auf. Der Zusatzwerkstoff Metallpulver wird über eine Pulverdüse in der Optik zugeführt.

Divergenz

(= lat. Aufweitung) Laserstrahlen sind gerichtet. Sie sind jedoch keine Parallelstrahlen, sondern weiten sich zunehmend auf. Diese Aufweitung wird als Divergenz bezeichnet. Der Öffnungswinkel (Divergenzwinkel) gibt an, wie stark sich der Laserstrahl aufweitet.

Emission

(= lat. Aussendung) Der Begriff bezeichnet in der Lasertechnik das Aussenden von Laserlicht im aktiven Medium.

Energie

Physikalische Größe. In der Materialbearbeitung mit dem Laser ist meist die gesamte eingebrachte Energie von Interesse, also die

Energie, die auf das Werkstück einwirkt. Diese Energie entspricht der Laserleistung multipliziert mit der Einwirkzeit. In einigen Fällen ist auch die Energie eines einzelnen Laserphotons wichtig. Diese Photonenenergie hängt von der Wellenlänge ab. Es gilt: Je kürzer die Wellenlänge, desto größer die Energie.

Festkörperlaser

Gängiger Lasertyp in der Materialbearbeitung. Das aktive Medium ist ein dotierter Kristall oder dotiertes Glas. Typische Beispiele sind: Nd:YAG und Yb:YAG (Neodym-dotierter und Ytterbium-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat) sowie Yb:Glas. Daneben gibt es weitere, wie etwa Nd:YVO₄ (Neodym-dotiertes Yttrium-Vanadat). Die Wellenlänge eines Festkörperlasers hängt überwiegend vom Dotierungsmaterial ab und beträgt für die genannten Medien rund 1 Mikrometer.

Fokus

Die Stelle nach der Fokussierlinse oder dem Fokussierspiegel, an der der Laserstrahl seinen geringsten Querschnitt hat. Die Querschnittsfläche des Fokus bestimmt die Leistungsdichte. Der Fokus hat in der Regel einen kreisförmigen Querschnitt. Daneben gibt es auch andere Querschnitte, zum Beispiel den Linienfokus.

Frequenz

Schwingungseigenschaft. In Bezug auf die Lasertechnik: Eigenschaft des Laserstrahls. Die Frequenz gibt die Schwingungen der elektromagnetischen Wellen pro Sekunde an. Die Einheit der Frequenz ist Hertz (Hz).

Härten

Verfahren, um die Festigkeit von Werkstückoberflächen zu erhöhen. Der Laserstrahl erwärmt die Randschicht des Werkstücks und bewirkt so eine Gefügeumwandlung im Metall (Austenitisierung). Anschließend kühlt der umgebende kalte Werkstoff die Schicht sehr schnell ab. So bildet sich ein neues Gefüge (Martensit), und der Härtegrad steigt. Härten lassen sich Kohlenstoffstähle und Gusswerkstoffe.

Kohärenz

Eigenschaft des Laserlichts: Die elektromagnetischen Wellen schwingen im Gleichtakt – sie haben die gleiche Phasenlage.

Laser

Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Sinngemäß: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Das Akronym Laser beschreibt bereits den physikalischen Vorgang des Laserprinzips: Laserlicht entsteht, indem ein Photon ein angeregtes Atom oder Molekül veranlasst, ein weiteres Photon zu emittieren. Das emittierte Photon hat die gleiche Wellenlänge und die gleiche Phasenlage wie das erste Photon. Der Begriff Laser steht oft synonym für Strahlquelle oder Laserstrahl.

Laserformen

Auch: direktes Laserformen. Verfahren zum schichtweisen Aufbauen von Teilen aus Metallpulver. Der Laserstrahl schmilzt jeweils den Bauteilquerschnitt auf. Schicht für Schicht entsteht das Teil.

Leistung

Auch: Laserleistung. Kenngröße des Laserstrahls und Parameter für die Materialbearbeitung. Leistung ist definiert als Energie pro Zeit. Oder bildlich gesprochen: Die Laserleistung entspricht der Energie aller Photonen im Laserstrahl, die an einem gedachten Beobachtungspunkt innerhalb einer Sekunde vorbeifliegen.

Leistungsdichte

Auch Intensität genannt. Kenngröße des Laserstrahls und Parameter für die Materialbearbeitung. Die Leistungsdichte ist definiert als Leistung pro Fläche. Im Fokus ist die Leistungsdichte am höchsten.

Licht

Physikalisch betrachtet: elektromagnetische Strahlung mit einer bestimmten Wellenlänge. Der Begriff steht zunächst für das sichtbare Spektrum (480 bis 780 Nanometer) und umfasst darüber hinaus auch den infraroten und ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Mode

Geordnete Leistungsdichteverteilung im Laserstrahl, die aufgrund von optischer Resonanz im Resonator entsteht. Der Grundmode ist der Gauß-Mode. Daneben gibt es Moden höherer Ordnung, zum Beispiel den Ring-

Mode und die Überlagerung von Moden, so genannte Multimoden.

Monochromatisch

Einfarbig. Eigenschaft des Laserlichts: Alle elektromagnetischen Wellen im Laserstrahl haben die gleiche Wellenlänge.

Plasma

Aggregatzustand, der energetisch gesehen über dem gasförmigen Zustand liegt. Die Bestandteile eines Stoffes liegen in atomarer, ionisierter Form vor. In der Materialbearbeitung kann Plasma als Nebenprodukt entstehen. Metallplasma zum Beispiel absorbiert CO₂-Laserstrahlen und beeinflusst somit den Bearbeitungsprozess.

Polarisation

Schwingungsrichtung der Lichtwellen. Man unterscheidet: unpolarisiertes Laserlicht, in dem die Lichtwellen zufällig (statistisch) in verschiedene Richtungen schwingen; linear polarisiertes, bei dem die Schwingungsrichtung in einer Ebene liegt; sowie zirkular polarisiertes, bei dem sich die Schwingungsrichtung dreht. Zur Materialbearbeitung wird vor allem unpolarisiertes und zirkular polarisiertes Laserlicht eingesetzt. Einige Lasertypen erzeugen linear polarisiertes Laserlicht. Dieses wird mit so genannten Phasenschieber-Spiegeln in zirkular polarisiertes Laserlicht umgewandelt.

Prozessparameter

Einflussgrößen, mit denen sich der Bearbeitungsprozess gestalten lässt. Beispiele sind: Laserleistung, Leistungsdichte, Fokusdurchmesser, Fokuslage, Bearbeitungsgeschwindigkeit und Betriebsart.

Pulsbetrieb

Betriebsart der Strahlquelle. Im Gegensatz zum Dauerstrichbetrieb wird das aktive Medium nicht kontinuierlich angeregt, sondern in Pulsen. Es emittiert einen zeitlich unterbrochenen Laserstrahl. Wichtige Parameter für die Materialbearbeitung sind: Dauer und Energie eines solchen Laserpulses sowie die Pulsfrequenz.

Pumpen

Meint das Anregen des aktiven Mediums. Beim Pumpen wird dem aktiven Medium Energie zugeführt, entweder optisch, elektrisch

oder durch eine chemische Reaktion. Ziel ist es, im aktiven Medium eine Besetzungsinversion zu erzeugen. Dann befinden sich mehr Atome oder Moleküle im angeregten Zustand als im Grundzustand, und der Laserprozess kann stattfinden.

Rayleighlänge

Die Rayleighlänge ist ein Maß für die Schärfentiefe des fokussierten Laserstrahls. Sie gibt an, in welchem Abstand vom Fokus sich die Querschnittsfläche des Laserstrahls gegenüber der Querschnittsfläche im Fokus verdoppelt hat. Die doppelte Rayleighlänge wird von Anwendern häufig als Schärfentiefe bezeichnet.

Reflexion

Spiegelung. In der Lasertechnik: Spiegelung von Laserlicht an Grenzschichten. Beispiele: Während der Bearbeitung reflektiert die Werkstückoberfläche einen großen Teil des Laserlichts. In der Glasfaser des Laserlichtkabels wird der Laserstrahl durch Totalreflexion geleitet.

Resonator

Allgemein: schwingungsfähiges System, das besonders stark schwingt, wenn es mit der Eigenfrequenz angeregt wird. In der Lasertechnik: schwingungsfähiges System für Laserlicht. Der Resonator besteht meist aus 2 Spiegeln. Die Spiegel sorgen dafür, dass der Laserstrahl das aktive Medium immer wieder durchläuft und dabei verstärkt wird. Dadurch bestimmt der Resonator auch die Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls.

Schmelzschnneiden

Trennverfahren für schmelzbare Werkstoffe, überwiegend Metalle. Der Laserstrahl schmilzt das Werkstück entlang der Teilekontur fortlaufend auf. Ein inertes Arbeitsgas, wie Helium, Argon oder Stickstoff, wird mit hohem Druck in die Schnittfuge geblasen und treibt die Schmelze heraus.

Schutzgas

Gas, das eingesetzt wird, um das Bearbeitungsergebnis vor ungewollten Reaktionen mit der Umgebungsluft zu schützen. Beim Schweißen schirmt das Schutzgas beispielsweise die Oberfläche der Schweißnaht von der Umgebungsluft ab und verhindert deren Oxi-

dation. Als Schutzgase werden inerte Gase eingesetzt.

Schweißen

Thermisches Fügeverfahren. Zu den Laserschweißverfahren zählen: Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen von Metallen sowie Durchstrahlschweißen von Kunststoffen.

Strahlführung

Der Weg zwischen Strahlquelle und Bearbeitungsoptik sowie die Bauteile, die den Laserstrahl führen. Laserstrahlen können frei geführt werden, zum Beispiel in Strahlschutzrohren und Faltenbälgen. Laserstrahlen von Festkörper- und Diodenlasern lassen sich in Laserlichtkabeln zur Bearbeitungsoptik leiten.

Strahlqualität

Grundlegende Eigenschaft des Laserstrahls. Die Strahlqualität beschreibt das Ausbreitungsverhalten des Laserstrahls und somit auch seine Fokussierbarkeit. Die Strahlqualität wird bestimmt durch die Aufweitung (Divergenz) des Laserstrahls nach der ersten Strahltaile und deren Durchmesser. Kenngrößen, die die Strahlqualität beschreiben, sind das Strahlparameterprodukt, der M^2 -Wert und die K-Zahl.

Strahlquelle

(Lasergerät) Das Gerät, das den Laserstrahl erzeugt. Grundlegende Bestandteile einer Strahlquelle sind: das aktive Medium, das das Laserlicht aussendet; der Resonator, der den Laserstrahl ausrichtet und dafür sorgt, dass er das aktive Medium immer wieder durchläuft; die Pumpquelle, die das aktive Medium anregt; die Kühlung, die die Wärme ableitet.

Tiefschweißen

Fügeverfahren für Metalle. Der Laserstrahl schmilzt und verdampft Material entlang der Fugestelle. Im Metall bildet sich eine schmale, tiefe Dampfkapillare (Keyhole), die sich mit dem Laserstrahl durch das Material bewegt. Hinter der Dampfkapillare fließen die Schmelzen zusammen und erstarren. Dabei entstehen tiefe, schlanke Nähte.

Umschmelzen

Verfahren zur Oberflächenbehandlung von Metallen. Der Laserstrahl schmilzt die Werkstückoberfläche fortlaufend auf. Beim Erstarren bildet sich ein neues Gefüge (Neukristalli-



sation). Dieses Gefüge ist feiner, gleichmäßiger und weist veränderte Eigenschaften auf, zum Beispiel höhere Verschleißfestigkeit oder höhere Korrosionsbeständigkeit.

Wärmeleitungsschweißen

Fügeverfahren für Metalle. Der Laserstrahl schmilzt die Fügepartner entlang der Fügestelle oberflächlich auf. Die Schmelzen verbinden sich und erstarren. Beim Wärmeleitungsschweißen entstehen Nähte mit glatten Oberflächen. Deshalb eignet sich das Verfahren besonders für Sichtkanten.

Wellenlänge

Schwingungseigenschaft. In Bezug auf die Lasertechnik: Eigenschaft des Laserstrahls. Die Wellenlänge gibt die Entfernung zwischen zwei Wellenbergen einer elektromagnetischen Welle an. Die Einheit der Wellenlänge ist Meter.

Zusatzwerkstoffe

Alle Werkstoffe, die während des Bearbeitungsprozesses dem Werkstück zugeführt werden.



Index

A

| | |
|----------------------------|-----------------|
| Abstandsregelung | 6-12 |
| Adaptive Spiegel | 3-7 |
| Aktives Medium | 1-10 |
| Aluminium | 5-23 |
| Aluminiumlegierungen | 5-23 |
| Anregung | 1-10 |
| Arbeitsgas | 5-7, 5-29, 5-31 |
| Auswaschungen | 7-5 |
| Auswertungstabelle | |
| • Vorlage | 7-12 |
| Axialrundnaht | 5-14 |
| Axiconspiegel | 2-7 |

B

| | |
|--------------------------|------|
| Bearbeitungskopf | |
| • Laserschweißkopf | 5-8 |
| Bearbeitungsoptik | 4-6 |
| Beschichten | 5-48 |
| Betriebsarten | 2-10 |
| Beugungsmaßzahl | 1-7 |
| Bildweite | 4-4 |
| Bördelnaht | 5-13 |
| Brennschneiden | 5-30 |
| Brennweite | 4-5 |
| Buntmetalle | 5-23 |

C

| | |
|---------------------------|-----|
| CO ₂ -Laser | |
| • Diffusionsgekühlt | 2-6 |
| • Einsatzgebiete | 5-3 |
| • Geströmt | 2-4 |
| • Merkmale | 2-3 |
| Coax-Laser | 2-6 |
| • Strahlgang | 2-8 |

D

| | |
|------------------|----------|
| Dampfkanal | 5-6, 5-9 |
|------------------|----------|

| | |
|---|------------|
| Dauerstrichbetrieb | 2-10 |
| DIN EN ISO 9013 | 7-2 |
| Direct Metal Deposition-Verfahren | 5-50 |
| Divergenz | 4-6 |
| Druckluftschneiden | 5-32 |
| Düse | 1-12, 5-28 |
| Düsenkühlung | 4-7 |

E

| | |
|---------------------|------|
| Eckige Rohre | 5-40 |
| Ecknaht | 5-13 |
| Edelmetalle | 5-23 |
| Emission | |
| • Stimulierte | 1-2 |

F

| | |
|-------------------------|----------------|
| Fokusedurchmesser | 4-4 |
| Fokussieren | 4-3 |
| Fokussierlinse | 1-12, 3-3, 4-7 |
| Fokussieroptik | 5-28 |
| Fügelhilfen | 5-18 |

G

| | |
|------------------------------------|------|
| Gauß-Mode | 1-7 |
| Gaußschen Normalverteilung | 1-7 |
| Gemittelte Rautiefe Rz | |
| • TRUMPF-Richtwerte | 7-8 |
| Gemittelte Rautiefe R_{z5} | 7-6 |
| • Messen | 7-7 |
| Gratbildung | 7-3 |
| Gratfreiheit | 5-35 |
| Grundmode | |
| • TEM ₀₀ | 1-7 |

H

| | |
|-----------------------|------|
| Helixspiegel | 2-7 |
| HF-Anregung | 2-9 |
| Hybridverfahren | 5-11 |

I

| | |
|-----------------------------|------|
| I-Naht | 5-13 |
| Intensitätsverteilung | 1-7 |

K

| | |
|----------------------------|----------|
| Kehlnaht | 5-14 |
| Kennlinie | 6-13 |
| • Mehrkanalrohr | 6-14 |
| Kennzeichnen | 5-42 |
| Keyhole | 5-6, 5-9 |
| Kohärenz | 1-5 |
| Kolkungen | 7-5 |
| Körnen | 5-42 |
| Kreisförmiges Körnen | 5-42 |
| Kühlung | 1-11 |

L

| | |
|---|------------|
| Laser | |
| • Anlage | 1-11 |
| • Definition | 1-2 |
| • Gaskühlung | 2-3 |
| • Gasumwälzung | 2-3 |
| • Sicherheit | 1-13 |
| • Typen | 1-9 |
| Laserhärten | 5-43, 5-44 |
| • Facetten-Optik | 5-44 |
| • Scanner-Optik | 5-44 |
| Laserinduziertes Plasma | 5-9 |
| Laserleistung und Material | 5-35 |
| Laserlicht | |
| • Eigenschaften | 1-5 |
| Laserschneiden | |
| • Einsatz | 5-40 |
| • Merkmale | 5-33 |
| • Prinzip | 5-28 |
| • Vorteile | 5-39 |
| Laserschweißen | 5-6 |
| • Aluminium, Aluminiumlegierungen | 5-22 |
| • Brennweite | 5-19 |
| • Buntmetalle | 5-23 |
| • Edelmetalle | 5-23 |
| • Einsatz | 5-21 |
| • Merkmale | 5-12 |
| • Nichteisenmetalle | 5-22 |
| • Polarisierung | 5-20 |
| • Prinzip | 5-6 |
| • Stähle | 5-21 |
| • Strahlqualität | 5-19 |

| | |
|-------------------------------------|----------------|
| • Titan- und Titanlegierungen | 5-23 |
| • Verfahren | 5-8 |
| • Vorteile | 5-21 |
| Laserschweißkopf | 5-8 |
| Linear polarisiertes Licht | 4-13 |
| Linse | 1-12, 3-3, 4-7 |
| Linsen-Überwachungssensorik | 4-12 |

M

| | |
|-----------------------------|------|
| Mehrkanalrohr | |
| • Bearbeitung | 6-14 |
| • Vorschub reduzieren | 6-16 |
| Mehrstationenbetrieb | 3-9 |
| Moden | 1-7 |
| Modeschuss | 1-8 |
| Monochromatisch | 1-5 |
| Multi-Mode | 1-8 |

N

| | |
|-------------------------|------|
| Naht | |
| • Vorbereitung | 5-15 |
| Nahtart | 5-15 |
| Nahtfehler | 5-24 |
| Nahtgeometrien | 5-13 |
| Neigungstoleranz | 7-10 |
| Nichteisenmetalle | 5-22 |

O

| | |
|-----------------------------|-----------|
| Oberflächen behandeln | 5-3, 5-43 |
|-----------------------------|-----------|

P

| | |
|--|------|
| Phasenschieber | 1-12 |
| Plasmaunterstütztes Laserschneiden | 5-32 |
| Polarisation | |
| • Laserschweißen | 5-20 |
| Profil | |
| • Definition | 6-3 |
| • Mit Innenradius | 6-4 |
| Pulsbetrieb | 2-11 |
| Punktförmiges Körnen | 5-42 |

R

| | |
|--|-----------------|
| Radialrundnaht..... | 5-14 |
| Ramp-Betrieb..... | 2-12 |
| Rampenzyklus..... | 5-42 |
| Ramp-Zyklus..... | 2-12 |
| Rautiefe..... | 5-33, 5-39, 7-6 |
| Rayleighlänge..... | 4-4 |
| Rechtwinkligkeitstoleranz..... | 7-10 |
| • TRUMPF-Formel für Obergrenze..... | 7-10 |
| Resonator..... | 1-10, 2-3 |
| Rillennachlauf..... | 7-9 |
| Ring-Mode..... | 1-8 |
| Roboter..... | 5-41 |
| Rohr | |
| • Definition..... | 6-3 |
| • Gegenseite beeinflussen..... | 6-17 |
| • Gekrümmte Flächen bearbeiten..... | 6-9 |
| • Konturen in Ebene schneiden..... | 6-11 |
| • Qualität..... | 6-5 |
| • Qualitätsbeurteilung von Laserschnitten..... | 6-5 |
| • Querschnittformen..... | 6-3 |
| • Schneidabstand..... | 6-13 |
| Rohrschneidanlagen..... | 5-41 |
| Rohrschneiden | |
| • 2D..... | 6-6 |
| • 3D..... | 6-7 |
| Rohrteil | |
| • Freischneiden..... | 6-18 |
| Runde Rohre..... | 5-40 |

S

| | |
|------------------------------|-----------------|
| Scanneroptiken..... | 4-10 |
| Scannerschweißen..... | 5-12 |
| Schmelzschnneiden..... | 5-31 |
| Schneiddüse..... | 1-12, 4-7, 5-28 |
| Schneiden | |
| • Maschinen und Anlagen..... | 5-41 |
| Schneidgaszufuhr..... | 4-7 |
| Schneidgeschwindigkeit..... | 5-36, 5-39 |
| Schneidkriterien..... | 5-33 |
| Schneidoptiken..... | 4-9 |
| Schneidverfahren..... | 5-30 |
| • Brennschneiden..... | 5-30 |
| • Schmelzschnneiden..... | 5-31 |
| Schnittqualität..... | 7-2 |
| Schnittspalt..... | 5-33, 7-4 |
| • TRUMPF-Richtwerte..... | 7-5 |
| Schutzgas..... | 5-7 |
| Schweißen | |
| • Geschwindigkeit..... | 5-18 |
| • Maschinen und Anlagen..... | 5-27 |
| • Optik..... | 4-8 |

| | |
|-----------------------------|----------|
| • Verfahren..... | 5-6 |
| • Vorgang..... | 5-6 |
| Spannvorrichtungen..... | 5-17 |
| Spiegel..... | 3-3 |
| Spiegeloptik..... | 4-8 |
| Stähle..... | 5-21 |
| Strahlführung..... | 3-2 |
| Strahlparameterprodukt..... | 1-6 |
| Strahlqualität..... | 1-6, 4-5 |
| • Laserschweißen..... | 5-19 |
| Strahlquelle..... | 1-10 |
| Strahltaile..... | 1-6 |
| Strahlteiler..... | 3-9 |
| Strahlteleskop..... | 3-3, 3-5 |
| • Extern..... | 3-5 |
| Strahlweiche..... | 3-10 |

T

| | |
|---------------------------------|------|
| TEM ₀₀ | 1-7 |
| TEM _{01*} | 1-8 |
| TEM-Moden..... | 1-7 |
| Tiefschweißeffekt..... | 5-10 |
| Tiefschweißen | |
| • Mit Zusatzwerkstoff..... | 5-11 |
| • Ohne Zusatzwerkstoff..... | 5-9 |
| Titan und Titanlegierungen..... | 5-23 |
| Turboradialgebläse..... | 2-5 |
| TwistLas..... | 5-23 |

U

| | |
|-------------------------|-----------|
| Überlappnaht..... | 5-14 |
| Überwachungssensorik | |
| • Auskoppelspiegel..... | 4-12 |
| • Linse..... | 4-12 |
| Umlenkspiegel..... | 1-12, 3-3 |
| Umschmelzen..... | 5-45 |

V

| | |
|---------------------------------|-----|
| Verfahrbarer Spiegelträger..... | 3-8 |
|---------------------------------|-----|

W

| | |
|------------------------------------|------|
| Wärmeeinflusszone | 5-39 |
| Wellenlänge sichtbares Licht | 1-2 |

Z

| | |
|------------------------------------|------|
| Zinkselenid-Linse | 4-7 |
| Zirkular polarisiertes Licht | 4-14 |
| Zirkularpolarisator..... | 3-3 |