

Leseprobe

Jens Bliedtner, Hartmut Müller, Andrea Barz

Lasermaterialbearbeitung

Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele

ISBN (Buch): 978-3-446-42168-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-42929-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-42168-4>

sowie im Buchhandel.

auf eine sehr engbegrenzte Materialzone beschränkt ist, kann es in Abhängigkeit von den Prozessparametern zu unterschiedlichen Breiten im Schnittspaltbereich führen. Die Wärmebeeinflussung hat eine Änderung des Werkstoffgefüges zur Folge und kann von einer Farbänderung (Anlassfarben) bis zu einer Aufhärtung für bestimmte Werkstoffe (hoher C-Gehalt) in der unmittelbaren Schnittflächenumgebung führen. Eine zu starke Wärmebeeinflussung äußert sich in einer starken Verfärbung des Schnittes bis hin zum Verbrennen von filigranen Kontur-elementen. Die Ursachen dafür können sein:

- zu hohe Streckenenergie,
- zu geringer Gasdruck (Schmelzschnitten),
- zu großer Fokusbereich und falsche Fokusslage (zu geringe Intensität) und
- schlechte Strahlqualität.

## 7.5 Schweißen

In der industriellen Fertigung von Bauteilen und -gruppen hat sich das **Laserstrahlschweißen** fest etablieren können. Gründe hierfür sind hauptsächlich in den Eigenschaften der Laserschweißnaht, wie großes Aspektverhältnis (Verhältnis von Schweißnahttiefe zu Schweißnahtbreite) und geringe Wärmeeinflusszone, zu sehen. Damit bietet das Werkzeug Laserstrahl eine gute Möglichkeit, den bei konventionellen thermischen Fügeverfahren auftretenden Bauteilverzug stark zu minimieren und auch spezielle Schweißanforderungen für das Fügen zu erfüllen, wie bspw.

- kompliziert geformte Schweißkonturen,
- unterschiedliche Bauteildicken (tailored blanks) und
- artfremde Fügepartner.

Ferner weist das Laserstrahlschweißen ein großes Automatisierungspotenzial auf und erreicht aufgrund der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten sehr kurze Taktzeiten. Neben dem Serieneinsatz gestattet die hohe Flexibilität des Verfahrens auch die wirtschaftliche Fertigung kleiner Losgrößen bis zur Stückzahl „eins“.

Im Vergleich zu den konventionellen thermischen Schweißverfahren erfordern Laserstrahlver-

fahren infolge der örtlich stärker begrenzten Wechselwirkungszone relativ eng tolerierte Spaltmaße. Durch die hohen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten des Verfahrens muss die Aufhärtung bei kohlenstoffhaltigen Werkstoffen berücksichtigt werden.

Das Schweißen mit dem Laser wird durch die Eigenschaften der Laserstrahlung, des Werkstückes und der Prozessmedien sowie die Handhabungsbedingungen charakterisiert, die im Wesentlichen in Tabelle 7.26 zusammengestellt sind. Die Laserstrahlung wird nach der Auskopplung im Resonator durch ein Strahlführungssystem zur Bearbeitungsstelle geleitet und mit geeigneten Optiken auf die Werkstückoberfläche fokussiert. Der absorbierte Anteil der Laserstrahlung führt zu einer lokalen Erwärmung des Werkstückes, wobei dieses bei genügend hoher Intensität zu schmelzen beginnt. Durch die Relativbewegung Laserstrahl und Werkstück kühlt die Schmelze an der rückseitigen Schweißfront ab und erstarrt zu einem Gefüge. Bei

**Tabelle 7.26** Einflussparameter beim Laserstrahlschweißen

	Einflussparameter
Laserstrahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wellenlänge</li> <li>▪ Intensitätsverteilung</li> <li>▪ Strahlqualität und -durchmesser</li> <li>▪ Polarisierung</li> <li>▪ Fokusslage</li> <li>▪ Leistung (cw, gepulst)</li> </ul>
Werkstück	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Material</li> <li>▪ Dicke</li> <li>▪ Oberflächenzustand</li> <li>▪ Gefügestand</li> <li>▪ Kantenvorbereitung</li> </ul>
Prozessmedien	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prozessgas</li> <li>▪ Gasfluss bzw. -menge</li> <li>▪ Düsendurchmesser</li> <li>▪ Zusatzwerkstoff</li> <li>▪ Größe des Zusatzmaterials</li> <li>▪ Fördergeschwindigkeit bzw. -menge des Zusatzmaterials</li> </ul>
Handhabung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schweißgeschwindigkeit</li> <li>▪ Schweißrichtung und -position</li> <li>▪ Zugänglichkeit</li> </ul>

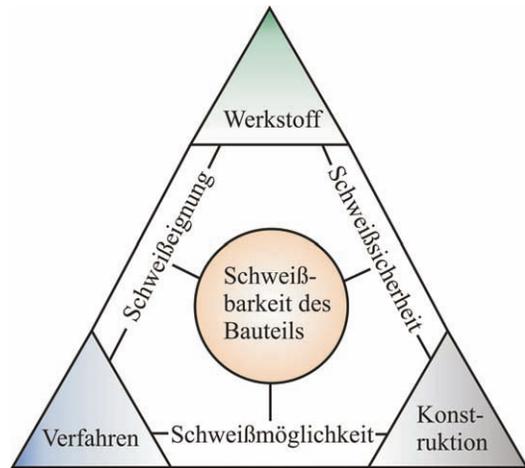
diesem Schweißprinzip spielen Wärmeleitungsprozesse eine vordergründige Rolle, denn erhöht man die Intensität über einen Schwellbereich hinaus, kommt es zur Ausbildung einer Dampfkapillare und die Einschweißtiefen können deutlich vergrößert werden. In den vielfältigen Anwendungen des Laserstrahlschweißens lassen sich weitere Verfahrensprinzipien unterscheiden. So haben sich bspw. handgeführte Schweißprozesse oder auch die Verfahren des Auftragsschweißens sowie hybride Technologien (Kombination mit MIG- oder MAG-Schweißquellen) etabliert.

### 7.5.1 Schweißtechnische Grundlagen

Eine wichtige Voraussetzung für den Schweißprozess ist die **Schweißeignung** des gewählten Werkstoffes bzw. des Verbundes. Zusätzlich müssen die Konstruktion und die fertigungstechnische Realisierbarkeit betrachtet werden. In der Schweißpraxis wird von der sogenannten **Schweißbarkeit** gesprochen /*Matt2002*/, die durch drei Größen maßgeblich bestimmt wird

- Schweißeignung (Werkstoff – Verfahren),
- Schweißsicherheit (Werkstoff – Konstruktion),
- Schweißmöglichkeit (Verfahren – Konstruktion).

Im sog. **Schweißdreieck** (Bild 7.123) sind die Abhängigkeiten bzw. Verknüpfungen der genannten Größen dargestellt.



**Bild 7.123** Veranschaulichung der Schweißbarkeit nach DIN 8528

Für Metalle und Legierungen ist der Laserschweißprozess durch:

- eine sehr schnelle Erwärmung ( $> 10\,000\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
  - eine konzentrierte und örtlich begrenzte Wärmebringung sowie
  - einen kurzen Wechselwirkungsprozess mit großen Abkühlraten
- gekennzeichnet (DVS3203).

Die **Schweißeignung** eines Werkstoffes wird sehr stark durch seine chemische Zusammensetzung bestimmt. Die sich daraus ableitenden Schmelz- und

**Tabelle 7.27** Schweißeignung ausgewählter metallischer Werkstoffe mit dem CO<sub>2</sub>-Laser (DVS3203)

Wst.-Nr. DIN 17007	Bezeichnung	Schweißeignung	Maßnahme
1.0116	St 37-3	A	–
1.0060	St 60-2	B	Vorwärmen
1.4034	X46Cr13	B	Glühen
1.4301	X5CrNi 1810	A	–
3.0255	Al99,5	A	–
3.3655	AlMg5	C	–
3.7035	Ti2	B	besonderer Gasschutz und Zusatzwerkstoff erforderlich
3.7115	TiAl5Sn2.5	C	–

Verdampfungstemperaturen sind für die Prozessauslegung ebenso relevant wie das Wärmeleitvermögen. Umfangreiche Technologiedaten zur Schweiß-eignung der unterschiedlichsten Werkstoffe sind in den DVS-Richtlinien zusammengestellt, wobei die Werkstoffe in drei Kategorien eingeteilt werden:

- A - ohne besondere Maßnahme schweißgeeignet,
- B - unter besonderer Maßnahme schweißgeeignet (Vorwärmen, Wärmenachbehandlung etc.),
- C - begrenzt schweißgeeignet (DVS3203).

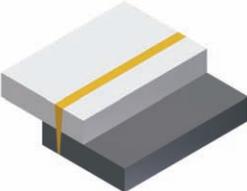
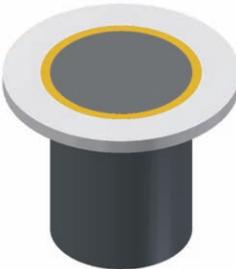
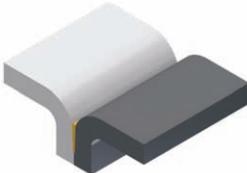
Tabelle 7.27 veranschaulicht die **Schweißbeignung** verschiedener Metalle mit dem CO<sub>2</sub>-Laser. Die an-

gegebene charakteristische Klassifizierung lässt jedoch nur generelle Aussagen zu und muss ggf. durch eigene Schweißuntersuchungen in Abhängigkeit von den speziellen Randbedingungen bestimmt werden.

Eine wichtige Werkstoffgruppe für das Laserstrahlschweißen bilden die Stähle, für die die Abschätzung der Schweißbeignung nach Stahlgruppen erfolgt und die entsprechend den Legierungsgehalten unterteilt werden in

- unlegierte,
- niedrig legierte und
- hochlegierte Stähle.

**Tabelle 7.28** Schweißnahtarten und deren Vor- und Nachteile /Trumpf2006-2/

Nahtgeometrien	Besonderheiten	Nahtgeometrien	Besonderheiten
	<p><b>Kehlnaht</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ aufwendige Nahtvorbereitung (Spaltmaß gering)</li> <li>▪ günstiger Kraftfluss</li> <li>▪ ungünstige Zugänglichkeit</li> <li>▪ kann zu Bindefehlern neigen</li> </ul>		<p><b>I-Naht</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ aufwendige Nahtvorbereitung (Spaltmaß gering)</li> <li>▪ günstiger Kraftfluss</li> <li>▪ gute Zugänglichkeit</li> <li>▪ der Fügespalt sollte klein sein (Fügespalt "0")</li> </ul>
	<p><b>Überlappnaht</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ sehr geringer Aufwand der Nahtvorbereitung</li> <li>▪ ungünstiger Kraftfluss</li> <li>▪ sehr gute Zugänglichkeit</li> <li>▪ der Fügequerschnitt ist abhängig von der Nahtbreite</li> </ul>		<p><b>Axialrundnaht</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ aufwendige Nahtvorbereitung (Presspassung oder 3-Punkt-heften)</li> <li>▪ günstiger Kraftfluss</li> <li>▪ Zugänglichkeit ist abhängig von der Geometrie der Fügepartner</li> </ul>
	<p><b>Bördelnaht</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ sehr geringer Aufwand der Nahtvorbereitung</li> <li>▪ ungünstiger Kraftfluss</li> <li>▪ sehr gute Zugänglichkeit</li> <li>▪ höherer Materialaufwand</li> <li>▪ hohe Steifigkeit der Verbindung</li> </ul>		<p><b>Radialrundnaht</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ aufwendige Nahtvorbereitung (Spaltmaß gering)</li> <li>▪ günstiger Kraftfluss</li> <li>▪ gute Zugänglichkeit</li> <li>▪ besseres und leichteres Fixieren als bei der Axialrundnaht</li> </ul>

Eine Abschätzung der prinzipiellen Schweißbeignung der genannten Gruppen kann nach /Matt2002/ vorgenommen werden.

1. Eine Schweißbeignung für **unlegierte Stähle** liegt vor, wenn der Kohlenstoffgehalt  $C \leq 0,22\%$  beträgt (für  $0,22\% \leq C \leq 0,44\%$  ist der Stahl beznzt schweißgeeignet).
2. Für **niedriglegierte Stähle** liegt eine Schweißbeignung vor, wenn das Kohlenstoffäquivalent  $C_d \leq 0,4\%$  beträgt, wobei das Kohlenstoffäquivalent in Abhängigkeit von den Legierungselementen in Gewichtsprozenten wie folgt bestimmt wird

$$C_d = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu} + \text{Si}}{15} \% \quad (7.30)$$

Für Kohlenstoffgehalte  $> 0,4\%$  kann der Stahl mit besonderen Maßnahmen wie Vorwärmen oder Erhöhen der Streckenenergie teilweise geschweißt werden. Weiterführende Aussagen zur Schweißbarkeit können auch mit den jeweiligen Schweiß-ZTU-Diagrammen (Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild) getroffen werden.

3. Die Schweißbeignung für **hochlegierte Stähle** kann mit dem Cr-Ni-Äquivalent hinreichend genau abgeschätzt werden. Eine praktische Methode ist hierfür die Verwendung des SCHAEFFLER-Diagramms. Es ermöglicht die Bestimmung des Grundwerkstoffes, des Schweißzusatzes und der Lage des Schweißgutes. Die Schweißbeignung wird wesentlich durch die Lage des Schweißgutes bestimmt und sollte im Austenitbereich mit 10 – 15 % Ferrit liegen.

Das Laserstrahlschweißen ist bezüglich der möglichen fügbaren Werkstückformen sehr flexibel. Im einfachsten Fall ist dabei zwischen dem Schweißen **flacher** und **zylindrischer Werkstücke** zu unterscheiden, wobei folgende Schweißnähte möglich sind:

- Punktschweißnähte,
- lineare Schweißnähte,
- Radialrundschnweißnähte sowie
- Axialrundschnweißnähte.

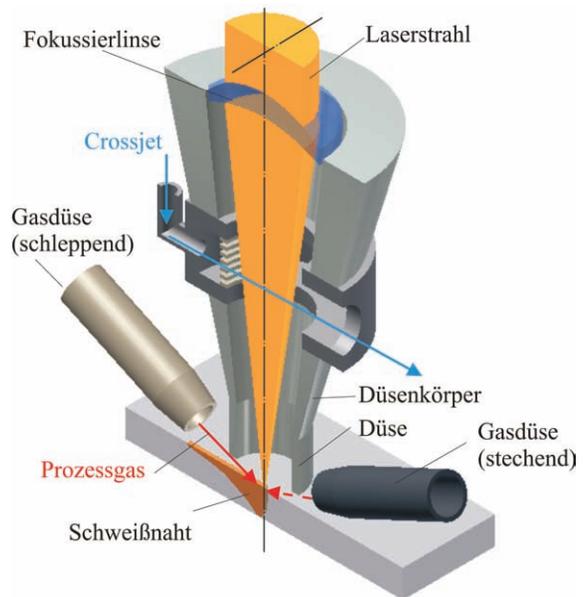
Tabelle 7.28 gibt eine Übersicht über mögliche Schweißnahtarten und deren Bewertung.

Die Gestaltung einer Schweißnaht wird durch die Art der Beanspruchung und die konstruktiven Erfordernisse des Bauteils bestimmt. Insofern muss neben der Schweißtiefe auch der Nahtquerschnitt Berücksichtigung finden. Eine Sonderform stellt das Punktschweißverfahren dar, da hier im Unterschied zu linearen Schweißnähten keine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück erfolgt. Der Schweißpunkt wird durch einen einzelnen Laserpuls oder eine Reihe von Laserpulsen erzeugt. Die Eindringtiefe lässt sich durch Strahlintensität, Pulsenergie und Pulsfrequenz steuern.

## 7.5.2 Grundlegende Schweißverfahren

In den folgenden Abschnitten wird der Schwerpunkt auf das Schweißen metallischer Werkstoffe gelegt und entsprechende Wechselwirkungsprozesse für diese Werkstoffgruppe diskutiert. Verfahrensanwendungen für Gläser und Kunststoffe sind separat in den Kapiteln 8 und 9 ausgeführt.

Beim Laserstrahlschweißen werden die Fügepartner partiell erwärmt und eine schmelzförmige Zone gebildet. Im **Fügespalt** kommt es aufgrund



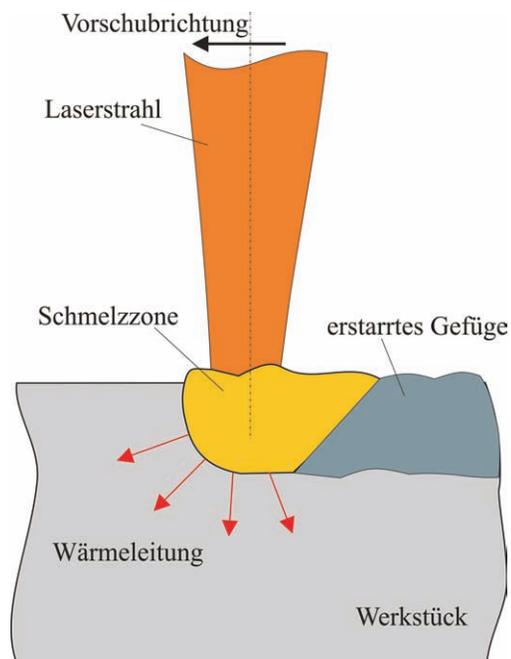
**Bild 7.124** Prinzipanordnung zum Laserstrahlschweißen

der geringeren Oberflächenspannung der niedrigviskosen Schmelzanteile zu einer Durchmischung der erschmolzenen Bereiche. Nach dem Erstarren der Schweißzone liegt ein stoffschlüssiger Verbund vor. Der Bereich der Schweißzone wird zumeist durch ein Schutzgas abgeschirmt, um unerwünschte Oxidationen durch den Luftsauerstoff auszuschließen. In der Anordnung in Bild 7.124 wird dies durch eine Zusatzdüse realisiert, die sowohl stehend (Gasstromrichtung entgegen der Vorschubrichtung) als auch schleppend (Gasstromrichtung in Vorschubrichtung) angeordnet sein kann. Seitliche Düsenanordnungen werden insbesondere beim Scannerschweißen angewandt. Eine Prinzipianordnung des Einsatzes von Festoptiken in koaxialen Gasstromzuführungen ist ebenfalls schematisch dargestellt. Für das Laserstrahlschweißen ist ein sogenannter Crossjet, ein aufgefächerter Gasstrom, erforderlich, der den Schweißoptiken meist Schutz vor aufsteigenden Prozessdämpfen und Spritzern bietet. Bei Schweißanwendungen mit FK-Lasern finden zusätzlich Schutzglasfenster Verwendung, die aus einem Substratmaterial und einer zweifachen AR-Beschichtung bestehen und sich zwischen der Schweißoptik und dem Crossjet befinden. Bei der nichtauszuschließenden Verschmutzung während des Schweißprozesses muss das Schutzglas nach entsprechenden Zeitintervallen ersetzt werden.

### 7.5.2.1 Wärmeleitungsschweißen

Beim **Wärmeleitungsschweißen** wird die Laserstrahlung an der Werkstückoberfläche absorbiert und die erforderliche Energie durch Wärmeleitung in das Bauteil geführt. Der Prozess, der mit vergleichsweise geringen Intensitäten geführt wird ( $I < 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), ist dadurch gekennzeichnet, dass das Material örtlich auf Schmelztemperatur erhitzt wird und im Fügebereich die absorbierte Leistung größer ist als die durch Wärmeleitung abgeführte Energie. Die Geometrie des sich einstellenden Schmelzbades und somit auch die Einschweißtiefe hängen direkt von der Wärmeleitung in das Werkstück ab. Bild 7.125 veranschaulicht das Prinzip des Wärmeleitungsschweißens. Von der Oberfläche gelangt die Wärme durch Wärmeleitung nahezu richtungsunabhängig in das Innere des Werkstücks und

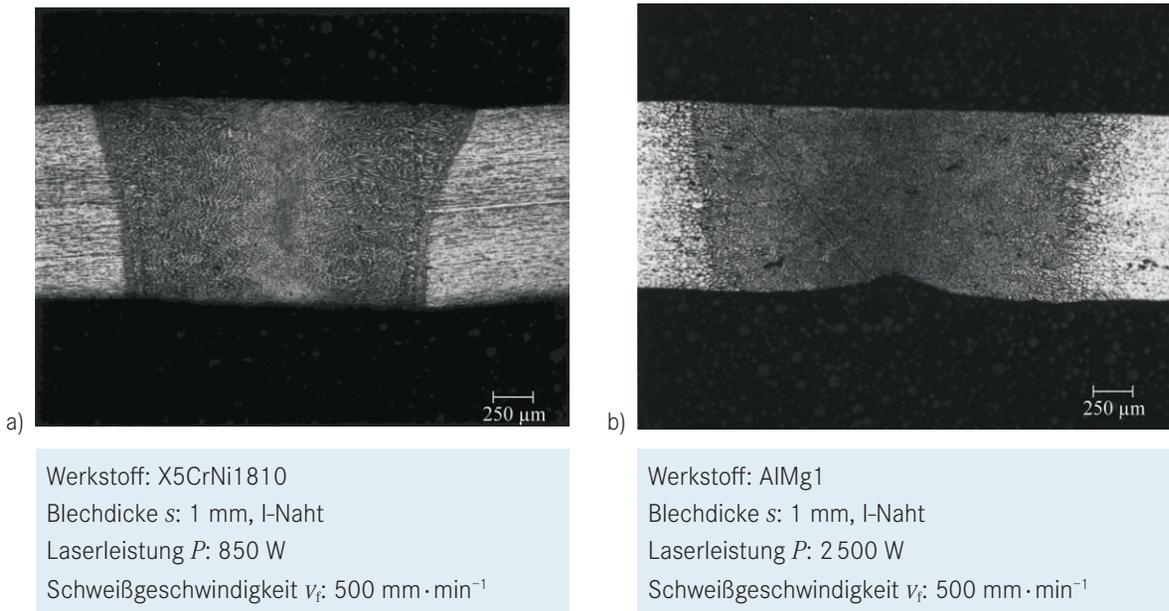
bildet ein radialsymmetrisches Temperaturgefälle aus, dessen Zentrum sich im Fokus des Laserstrahls befindet. In diesem Bereich verflüssigt sich ein kleiner Volumenanteil der erwärmten Zone und lässt eine Schweißnaht mit kreisförmigem Querschnitt entstehen. Unterhalb der Schwellintensität zum Tiefschweißen ist die **Einschweißtiefe** begrenzt und die Wärmeleitungsschweißnähte sind durch ein geringes Aspektverhältnis gekennzeichnet, das i. d. R. nicht über den Wert von 1 hinausgeht. Damit ist die Schweißnahtbreite größer als die -tiefe. Die Nahttiefen reichen von wenigen Zehntelmillimetern bis zu 1 – 3 mm. Ausgangsleistungen mit max.



#### Verfahrensprinzip

- Fokussierung der Laserstrahlung auf den Werkstoff mit Linse oder Spiegel
- Absorption der Laserstrahlung und lokale Erwärmung des Werkstoffs
- Aufschmelzen des Werkstoffs
- Erstarren des Fugenmaterials und Bildung einer Schweißnaht

**Bild 7.125** Prinzip des Wärmeleitungsschweißens



**Bild 7.126** I-Nahtdarstellungen des Wärmeleitungsschweißens. a) Querschliff – CrNi-Stahl, b) Querschliff – Aluminiumlegierung

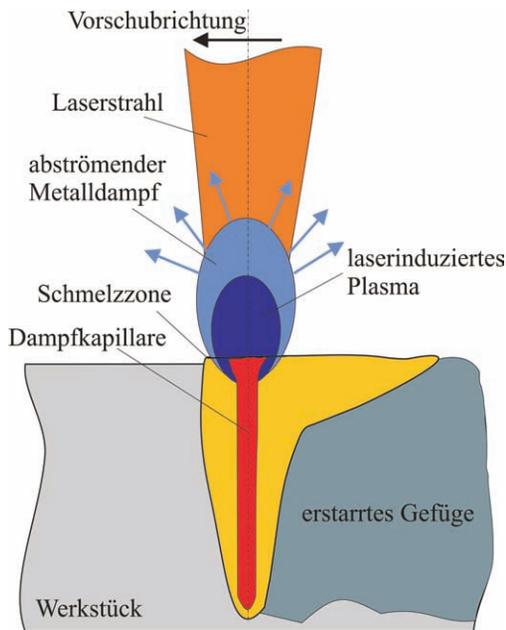
2 bzw. 3 kW reichen für die meisten Anwendungen aus, wobei dünne Werkstücke wie Folien oder Drähte sowie Blechstärken bis max. 3 mm erfolgreich gefügt werden können.

Bild 7.126 zeigt deutlich die Unterschiede des Wärmeleitungsschweißens an typischen Schweißnähten zweier verschiedener Materialien. Während im Bild a eine sehr homogen ausgebildete Handschweißnaht zu sehen ist, weist die Nahtgeometrie des Werkstoffs Aluminium (Bild b) zum einen erwartungsgemäß größere Schweißnahtbreiten und Wärmeeinflusszonen (WEZ) als beim Tiefschweißen auf und verfügt andererseits über keinen optimalen Wurzelbereich. Diese Erscheinung ist auf eine nicht-ausreichende Schweißnahtvorbereitung zurückzuführen, die für alle Schweißaufgaben, insbesondere aber für das Laserstrahlschweißen von sehr großer Bedeutung ist [Blie2000-2].

### 7.5.2.2 Tiefschweißen

Im Gegensatz zum vorstehend diskutierten Wärmeleitungsschweißen wird beim Tiefschweißen die Strahlungsintensität über eine für die Verdampfung

des Werkstückmaterials erforderliche Schwellintensität erhöht. In der Folge bilden sich neben der schmelzflüssigen Phase eine **Dampfkapillare** (auch **Keyhole** genannt) und eine Metaldampfwolke, die sich aufgrund der Erhitzung des Materials auf Verdampfungstemperatur an der Materialoberseite entwickelt (Bild 7.127). Durch die Absorption der Laserstrahlung in diesem Metaldampf und der damit verbundenen teilweisen Ionisation des Metaldampfes kann ein laserinduziertes **Metaldampfplasma** entstehen, das für die Strahlung der FK-Laser im nahen IR weitestgehend transparent ist und eine hellgelbliche teilweise sehr starke Leuchterscheinung zeigt. Im Gegensatz dazu kann die Strahlung des CO<sub>2</sub>-Lasers zu einem großen Teil in diesem Plasma absorbiert werden, was durch eine bläulich starke Leuchterscheinung gekennzeichnet ist. Dieser Effekt unterstützt sehr stark die Einkopplung der Laserstrahlung in die Schweißzone und erzielt wesentlich höhere Absorptionswerte als an einer rein metallischen Oberfläche. Die Funktion des Plasmas stellt eine wesentliche Prozessgröße dar und kann im Negativfall (z.B. Abschirmung der Laserstrah-



### Verfahrensprinzip

- Absorption der Laserstrahlung und lokale Erwärmung des Werkstoffs
- Aufschmelzen und Verdampfen des Werkstoffs
- Ausbildung einer Dampfkapillare
- Bewegung des Laserstrahles und der Dampfkapillare entlang der Schweißnaht
- Verdampfen des Materials an der Vorderfront der Dampfkapillare
- Strömen des Metalldampfes zur kälteren Rückfront der Kapillare und Kondensation der Schmelze
- Erstarren zum Gefüge und Bildung der Schweißnaht

**Bild 7.127** Prinzip des Tiefschweißens, Modell zur Ausbildung der Dampfkapillare

lung, vgl. Kapitel 5) aber auch zum Leistungsverlust in der Schweißzone führen.

Der Begriff **Tiefschweißen** leitet sich von einer wesentlichen Funktion der Dampfkapillare ab, die die Führung der Laserstrahlung tief in das Werkstück ermöglicht. Dieser Tiefschweißeffekt zeichnet sich durch große Aspektverhältnisse (Nahttiefe zu

Nahtbreite) im Bereich von 10:1 und größer aus. Der Durchmesser der Dampfkapillare liegt typischerweise in der Größenordnung des Strahldurchmessers, wobei die Tiefe des Keyholes nahezu identisch mit der Einschweißtiefe ist.

Die Ausbildung und Form der Kapillarengometrie sowie deren Stabilität im Schweißprozess bestimmen maßgeblich das erreichbare Bearbeitungsergebnis, denn in der Kapillare kann der Laserstrahl sehr effizient und nahezu vollständig in Wärme umgewandelt werden. Die Dampfkapillare formt sich sehr schnell und wird durch die relative Bewegung des Lasers zum Werkstück durch das zu fügende Volumen geführt. Durch den starken Temperaturanstieg in Richtung Fokuspunkt kann Material verdampft werden und sich das Keyhole ausbilden. In der weiteren Bewegung des Laserstrahles durch das Materialvolumen wird das Material an der Vorderfront der Kapillare vollständig aufgeschmolzen. Ein Teil des geschmolzenen Volumens umfließt die Kapillare als Schmelze, der andere Teil wird direkt verdampft und kondensiert anschließend an der Rückseite der Kapillare. Durch die Fortbewegung des Laserstrahles nimmt die Temperatur wieder ab und das Material erstarrt zur Schweißnaht. In */Beye1996/* und */Daus2004/* werden die schmelz-dynamischen Vorgänge ausführlich beschrieben.

Die Laserstrahlung wird beim Tiefschweißen durch Mehrfachreflexionen an den Begrenzungs-wänden der Kapillare bis in große Werkstücktiefen transportiert und nahezu vollständig absorbiert, wodurch sich eine gleichmäßige Erwärmung der Naht über die gesamte Eindringtiefe ergibt. Im Fall von Durchschweißungen entsteht von der Ober- zur Unterseite der Fügepartner eine offene Kapillare, die für eine ausreichende Entgasung sorgt, sodass die Bildung von Poren in der Schweißnaht weitestgehend vermieden werden kann. Für konkrete Schweißaufgaben muss die Geometrie der Strahlkapillare an die Werkstück- und Schweißnahtgeometrie angepasst werden. Die Schweißnahtgeometrie lässt sich in gewissen Grenzen variieren:

- die Einschweißtiefe – durch die RAYLEIGH-Länge der Laserstrahlung  $z_R$  und
- die Schweißnahtbreite – durch den Fokussdurchmesser  $d_f$ .

Das **Tiefschweißen** zeichnet sich durch hohe Vor-schubgeschwindigkeiten, kleine Wärmeeinflusszonen, schlanke und tiefe Schweißnähte sowie eine geringe thermische Belastung des angrenzenden Materialvolumens aus. Die **Energieeinkopplung** ist im Vergleich zum Wärmeleitungsschweißen jedoch deutlich stärker, wie in der stark zunehmenden Schweißtiefe und den geringeren WEZs (Bild 7.128) zu erkennen ist.

Bei den sehr komplexen Wechselwirkungsprozessen zwischen Laserstrahl und zu schweißendem Werkstoff müssen zusammengefasst folgende Gesichtspunkte besonders berücksichtigt werden:

- Einfluss der Wellenlänge des Lasers und Absorptionsverhalten bei hohen Intensitäten,
- thermodynamische Prozesse beim Erwärmen, Aufschmelzen und Verdampfen,
- Entstehung des Plasmas und Wechselwirkung mit der Laserstrahlung,
- Intensitätsverteilung, gewählte Streckenenergie sowie Schweißnahtform und -qualität.

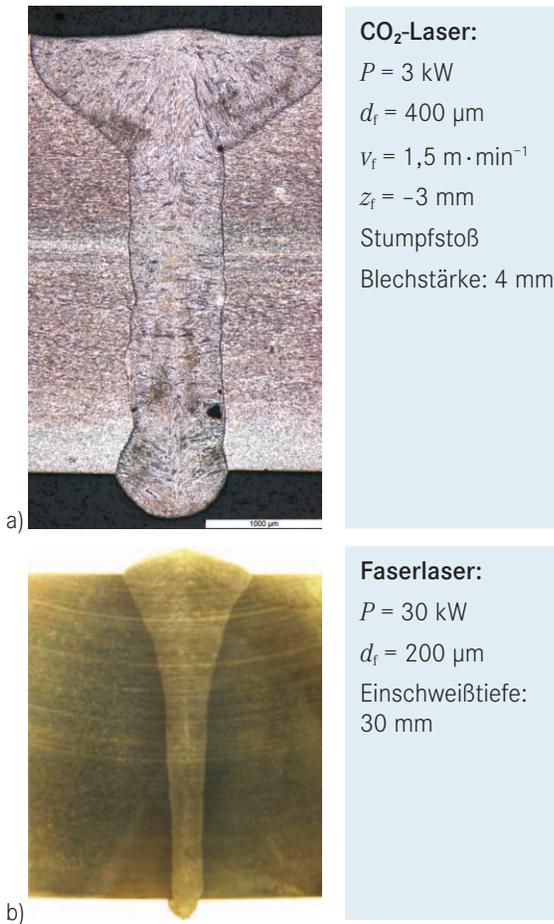
### 7.5.3 Einflussgrößen der Schweißverfahren

#### 7.5.3.1 Absorption der Laserstrahlung, Intensität und Einschweißtiefe

Die Auswahl der **Wellenlänge** und das daraus resultierende Absorptionsvermögen der Werkstoffe haben beim Schweißen eine große Bedeutung. Metallische Werkstoffe absorbieren die Wellenlängen der FK- und CO<sub>2</sub>-Laser bei geringen Intensitäten relativ schwach (etwa  $\leq 10\%$ ). Bei ansteigenden Intensitäten (vgl. Kapitel 5) kann aufgrund der anormalen Absorption die absorbierte Leistung im Materialvolumen sprunghaft ansteigen und die eingestrahlte Leistung zur deutlichen Erhöhung der Prozessenergie für den Schweißvorgang beitragen.

Bild 7.129 a veranschaulicht die Abhängigkeit der **Einschweißtiefe** von der Strahlungsintensität am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung. Bei Intensitäten unterhalb von  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  ist die Zunahme der Schweißtiefe mit ansteigender Intensität sehr gering und der Prozess wird durch das Wärmeleitungsschweißen bestimmt.

Wird eine bestimmte **Intensitätsschwelle** überschritten, so erfolgt ein starker Anstieg der Einschweißtiefe. Das Einsetzen dieser Schwelle ist jedoch stark materialabhängig und beträgt bspw. für Aluminium und Aluminiumlegierungen aufgrund des hohen Wärmeleitvermögens dieser Werkstoffgruppe  $10^7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , während bei Stählen in etwa  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  nötig sind. Bei dieser Laserintensität, auch Plasmaschwelle genannt, beginnt das Material zu verdampfen und im Werkstück bildet sich die Dampfkapillare aus. Infolge der höheren Grundabsorption setzt die Schwellintensität für FK- und Diodenlaser bereits bei geringeren Intensitäten ein (Bild 7.129 b).



**Bild 7.128** Schweißnahtdarstellung (Querschliff) des Tiefschweißens. a) Material Edelstahl, b) Material Baustahl /IPG2012/