



Praktikum Werkstofftechnologie

2. Semester Masterstudiengang



Versuch WT3

Trennen metallischer Werkstoffe mit dem CO₂-Laser

1. Versuchsziel und Aufgabenstellung

Ziel des Versuches ist es, mit der prinzipiellen Wirkungsweise einer CO₂-Laserstrahl-Schneidanlage vertraut zu machen. Mittels gezielter Experimente wird dabei der Einfluss der Parameter Laserleistung, Arbeitsgas und Vorschubgeschwindigkeit auf die Schnittqualität sowie die entscheidende Bedeutung einer präzisen Fokussierung der Laserstrahlung auf das Werkstück untersucht. In einem separaten Versuchsteil erfolgt zudem ein kurzer Einblick in die Programmierung freier Konturen. Nachfolgende Aufgaben sind durchzuführen.

- 1.1. Programmieren Sie mit Hilfe der vom Versuchsbetreuer gegebenen CNC-Befehle unter Berücksichtigung der nachfolgend diskutierten Grundlagen eine vorgegebene Kontur.
- 1.2. Messen Sie die Laserleistung in Abhängigkeit vom Injektionsstrom direkt am Laserausgang sowie unter dem Schneidkopf und bestimmen Sie daraus den Verlustfaktor der Laserschneidanlage.
- 1.3. Bestimmen Sie mit Hilfe der Methode der „schiefen Ebene“ die exakte Lage des Strahlungsfokus unterhalb des Schneidkopfes.
- 1.4. Durch geeignete Variation der Parameter Vorschub, Laserleistung, Fokusslage und Schneidgasdruck ist das Bearbeitungsergebnis zu optimieren. Die Schnittkantenqualität ist in Abhängigkeit der Parametervariation ausführlich zu diskutieren.
- 1.5. Die eingangs programmierte Kontur ist mit dem ermittelten, optimalen Parametersatz auszuschneiden, das Ergebnis bezüglich problematischer Stellen auf der Kontur auszuwerten und die Riefenstruktur der Schnittkanten mittels eines Mikroskops mit digitaler Kamera zu fotografieren. Aus dem Foto sind der Abstand sowie die Krümmung (Riefennachlauf) der Riefen zu bestimmen.

2. Grundlagen

Das Laserstrahlschneiden gehört auf Grund einer Reihe spezifischer Vorzüge, die es gegenüber Konkurrenzverfahren auszeichnen (z.B. hohe Flexibilität), zu den bisher mit Abstand am breitesten industriell eingesetzten Verfahren der Lasermaterialbearbeitung (LMB). Es ist ein thermisches Trennverfahren, das durch eine Vielzahl dynamischer Elementarprozesse gekennzeichnet ist (Abb. 1).

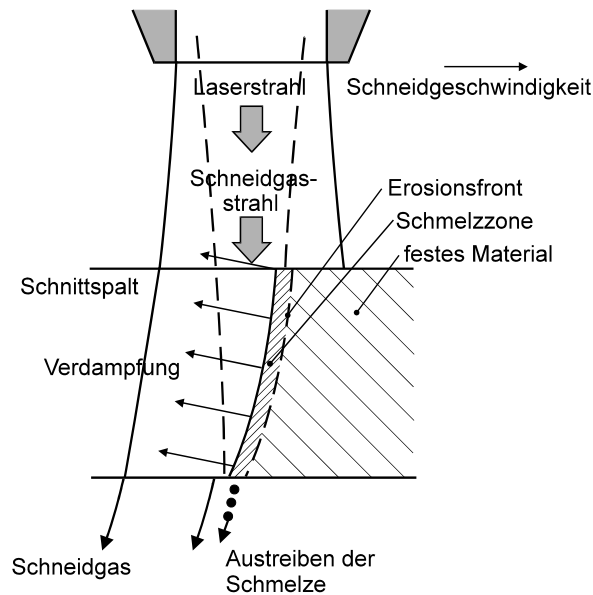


Abb. 1: Elementarprozesse beim Laserstrahlschneiden

Die fokussierte Laserstrahlung trifft auf die Werkstückoberfläche und wird je nach Werkstoffart und verwendeter Laserwellenlänge unterschiedlich stark absorbiert. Die daraus resultierende Temperaturerhöhung führt zum Aufschmelzen und/oder Verdampfen des Werkstoffes. Durch das verwendete Arbeitsgas wird das geschmolzene und verdampfte Material aus der Schnittfuge an der Werkstückunterseite ausgetrieben. Die konzentrische Führung von fokussiertem Laserstrahl und Arbeitsgas dient dabei zum einen dem Schutz der Fokussieroptik vor Dämpfen und Werkstoffspritzern und führt zum anderen zu einem von der Bearbeitungsrichtung unabhängigen Schneidergebnis.

Charakteristisch für das Laserstrahlschneiden ist die leicht geneigte Erosionsfront, die sich in Folge der Wechselwirkungsprozesse automatisch einstellt. Das Schmelzbad, das sich im Schnittspalt an der Grenze zum nichtaufgeschmolzenen Material bildet, besitzt eine hohe Eigendynamik. Letztere beeinflusst zusammen mit dem Arbeitsgasstrom wesentlich die Ausbildung der Schnittfuge (Riefenstruktur) und folglich das Bearbeitungsergebnis (z.B. Rauigkeit der Schnittkante)

2.1. Grundtypen des Laserstrahlschneidens

Je nach Art des dominanten Prozesses im Wechselwirkungsvolumen unterscheidet man drei Grundtypen des Laserstrahlschneidens:

a) Schmelzschneiden

Der Werkstoff wird im Wesentlichen nur aufgeschmolzen und die Schmelze mittels des Arbeitsgases ausgetrieben. Das Verfahren erlaubt oxidfreies Schneiden, da das Arbeitsgas (z.B. N₂, Ar) gleichzeitig eine Schutzgasfunktion ausübt, d.h. die unerwünschte Oxidation durch den Luftsauerstoff verhindert.

b) Sublimierschneiden

Durch ausreichend hohe Laserstrahlungsintensitäten wird der Werkstoff größtenteils verdampft. Das Arbeitsgas hat hier lediglich die Schutzgasfunktion. Dieses Verfahren ist zwar relativ energieaufwendig, erlaubt aber besonders präzise Schnitte.

c) Brennschneiden

Hier wird die exotherme Reaktion des als Arbeitsgas verwendeten Sauerstoffs mit dem Werkstoff ausgenutzt, um energetisch besonders effektiv zu schneiden. Die zusätzlich freigesetzte Energie kann dabei in der Größenordnung der Strahlungsleistung liegen, so dass beträchtlich höhere Schneidgeschwindigkeiten erzielt werden. Deshalb ist es das beim Metallschneiden (Eisenwerkstoffe!) am häufigsten eingesetzte Verfahren. Nachteilig kann sich allerdings die sich ausbildende dünne Oxidschicht auf der Schnittfläche auswirken, z.B. wenn das geschnittene Teil anschließend lackiert oder geschweißt werden soll. Dann ist gegebenenfalls eine Nachbehandlung der Schnittfläche erforderlich.

2.2. Einflussgrößen beim Laserstrahlschneiden

Die zahlreichen Einflussgrößen für das Schneiden mit Laserstrahlung fasst Tab. 2 zusammen. Einige werden in ihrer Wirkung nachfolgend kurz diskutiert.

Tab. 2: Einflussgrößen für das Laserstrahlschneiden

Werkstoff + Prozess	Laser	Fokussierung	Arbeitsgas
Werkstoffart	Leistung	Fokusbereich	Gasart
Werkstoffdicke	Wellenlänge	Rayleigh-Länge	Gasdruck
Schneidgeschwindigkeit	Modenstruktur	Fokuslage (relativ zum Werkstück)	Düsenform
	Divergenz		Abstand Düse-Werkstück
	Polarisation		

2.2.1. Werkstoffart

Die Werkstoffeigenschaften, von denen speziell

- das Absorptionsverhalten,
- die Schmelz- und Verdampfungstemperatur,
- die Schmelz- und Verdampfungswärme,
- die Wärmeleitfähigkeit,
- die Gefügestruktur und
- die chemischen Eigenschaften

hervorgehoben werden sollen, bestimmen weitgehend den einzusetzenden Lasertyp (Leistung, Wellenlänge, mögliche Betriebsregime) und die Prozessführung. Abbildung 2 macht deutlich, welche große Unterschiede in den Anforderungen an die Laserleistung und die Fokussierung bestehen, wenn drei unterschiedliche Metalle (Stahl, Kupfer, Aluminium) mit dem CO₂-Laser ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) geschnitten (also geschmolzen bzw. verdampft) werden sollen.

Die enormen Differenzen zwischen Stahl auf der einen sowie Kupfer und Aluminium auf der anderen Seite resultieren vor allem aus den im Vergleich zu Stahl wesentlich höheren Reflektivitäten und Wärmeleitfähigkeiten von Aluminium bzw. Kupfer.

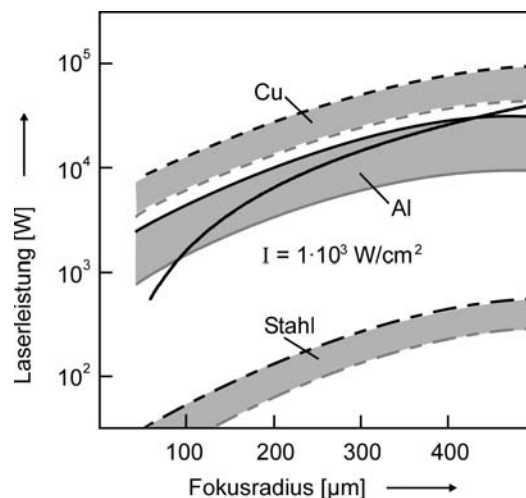


Abb. 2: Minimale Laserleistung für das Schmelzen (jeweils untere Kurve) und das Verdampfen (jeweils obere Kurve) als Funktion des Fokusradius (CO₂-Laserstrahlung) für Kupfer, Aluminium und Stahl

Dehnt man allein diesen Vergleich noch auf Dielektrika aus, wird das breite Parameterspektrum, das die Abdeckung der unterschiedlichsten Schneidaufgaben erfordert, verständlich.

2.2.2. Werkstoffdicke

Einen gravierenden Einfluss auf den Schneidprozess und die erreichbare Schnittqualität hat selbstverständlich die Werkstoffdicke. Drei Parameter sollen hier hervorgehoben werden:

Mindestleistung zum Trennen eines Bleches der Dicke d

Dass die Dicke d des Werkstückes die für den Schnitt aufzuwendende Energie mitbestimmt, ist offensichtlich. Bei einer Schnittbreite b und einer Schneidgeschwindigkeit v_s muss in einem Zeitabschnitt Δt das Volumen

$$V = d \cdot b \cdot v_s \cdot \Delta t$$

entfernt, also geschmolzen und/oder verdampft und ausgetrieben werden. Da die dafür benötigte Mindestenergie in einfachster Näherung dem Volumen V proportional ist, folgt daraus unmittelbar, dass die Streckenenergie (d.h. die pro Wegstück $v \cdot \Delta t$ eingebrachte Strahlungsenergie) einen Mindestwert zum Trennen des Werkstückes erreichen muss.

Die realen Randbedingungen (insbesondere die Wärmeleitung beim Schmelzschneiden oder der Oxidationsprozess beim Brennschneiden) erfordern nun eine gewisse Mindestschneidgeschwindigkeit. Wird diese unterschritten, geht z.B. durch Wärmeleitung unnötig viel Energie verloren. Beim Brennschneiden wird der Schnitt beim Unterschreiten einer Grenze (etwa 0,8 m/min) nicht mehr durch die Parameter des Laserstrahls, sondern durch das Sauerstoffbrennen kontrolliert, was mit einem enormen Qualitätsverlust der Schnittkante verbunden ist. Diese Mindestgeschwindigkeit bedeutet letztendlich, dass der Laserstrahl eine Mindestleistung besitzen muss, damit eine bestimmte Dicke d vernünftig geschnitten werden kann.

Merke: Als Richtwert für das Brennschneiden von Stahl mit CO₂-Laserstrahlung kann gelten, dass pro mm Werkstoffdicke ca. 100 W cw-Leistung erforderlich sind!

Abhängigkeit der maximal erzielbaren Schneidgeschwindigkeit von der Dicke d

Aus den vorstehenden Ausführungen folgt auch, dass bei vorgegebener Laserleistung P_L die erreichbare maximale Schneidgeschwindigkeit durch die Blechdicke bestimmt wird. Abbildung 3 a illustriert diesen Sachverhalt für das Brennschneiden von Stahl mit 4 unterschiedlichen kommerziellen 1 kW-CO₂-Lasern. Die maximal schneidbare Blechdicke liegt in Übereinstimmung mit der genannten Faustregel bei 10 mm.

Abhängigkeit der Schnittkantenqualität (Rautiefe) von d

Dass die Qualität der Schnittkante bei festem P_L ebenfalls eine Funktion der Blechdicke d ist, zeigt Abb. 3 b. Mit größer werdendem d steigt trotz jeweils optimierter Schneidparameter auch die Rautiefe R_z stetig an!

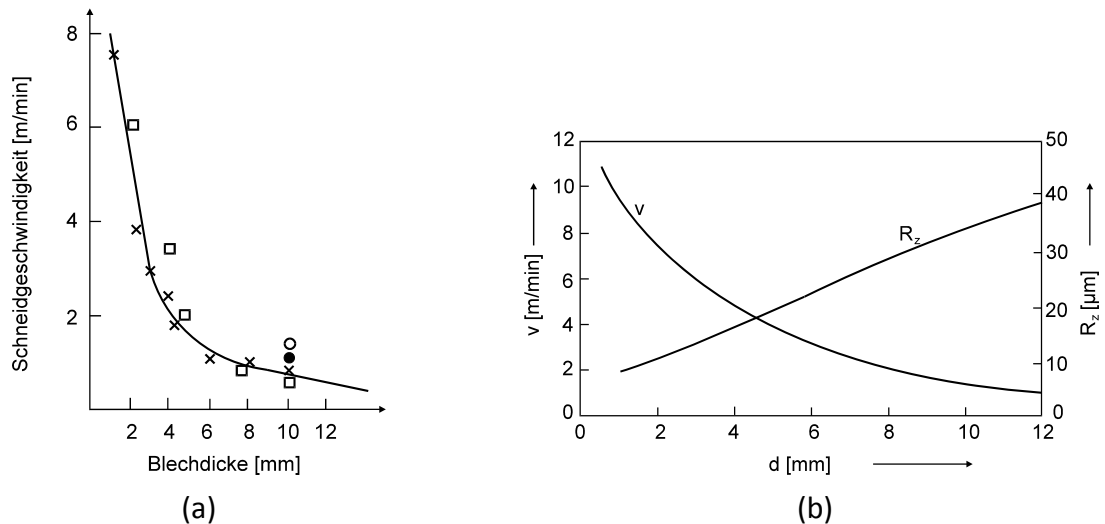


Abb. 3: Einfluss der Blechdicke d beim Brennschneiden von Stahl: Maximale Schneidgeschwindigkeit mit verschiedenen kommerziellen 1 kW-CO₂-Lasern (a) und resultierende Rautiefe R_z bei Verwendung eines 1,5 kW-CO₂-Lasers (b).

2.2.3. Laserleistung

Die Leistung als Grundparameter der Laserstrahlung bestimmt entscheidend den Schneidprozess insgesamt. Neben dem oben diskutierten Zusammenhang mit der maximal schneidbaren Blechdicke d legt sie einerseits die erreichbaren Schneidgeschwindigkeiten fest, beeinflusst andererseits aber auch in hohem Maße die Schnittqualität.

Am Beispiel des Schmelzscheidens von Bau- und Edelstahl ($d = 3$ mm) mit dem CO₂-Laser illustriert Abb. 4 zunächst die prinzipielle Relation zwischen v_s und P_L . Die Leistungsschwellen bei minimalen Schneidgeschwindigkeiten ergeben sich aus der bereits genannten Wirkung der Wärmeleitungsverluste.

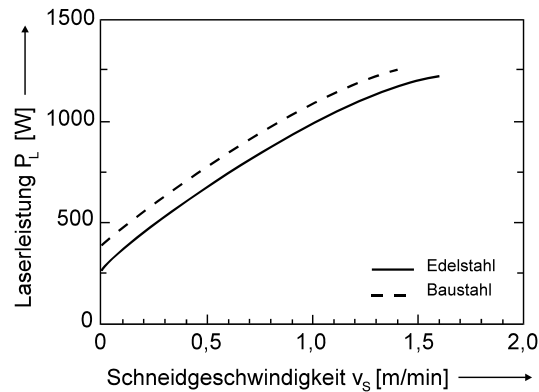


Abb. 4: Zur Relation zwischen Laserleistung und Schneidgeschwindigkeit beim Schmelzschnneiden von Bau- und Edelstahl mit dem CO₂-Laser

Beim Einfluss auf die Schnittqualität spielen noch andere, verfahrenstechnische Aspekte eine Rolle:

a) „Einstich“:

Der Startpunkt des Schneidvorganges liegt i.A. im Inneren der zu bearbeitenden Werkstückfläche, d.h. es ist ein „Einstich“ in das Material erforderlich. Auf Grund der Wärmeleitung (und beim Brennschneiden verstärkt durch das Sauerstoffbrennen) ist dabei ein „Bohrloch“ mit einem Durchmesser gleich der anschließenden Schnittfugenbreite i.A. nicht erreichbar (vgl. Abb. 5 a). Folglich ist ein „Einstich auf der Kontur“ bei hohen Qualitätsanforderungen unmöglich.

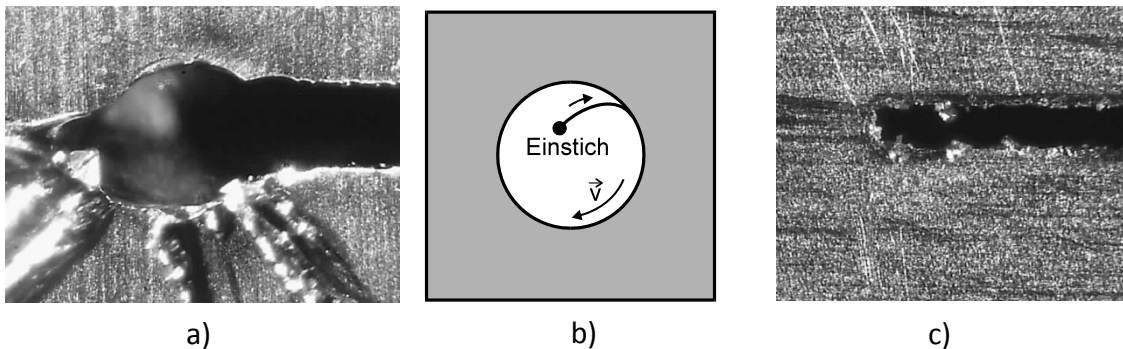


Abb. 5: Zum Einstich (siehe Text)

Eine „mechanische“ Lösung des Problems illustriert Abb. 5 b am Beispiel einer auszuschneidenden kreisförmigen Öffnung. Dabei erfolgt der Einstich im Abfallteil, den weiteren Schnittweg zeigt die Abbildung. Universeller (weil ohne Abfall) und eleganter ist das echte Einstechen auf der Kontur mittels geeignet gepulster Laserstrahlung (Abb. 5 c). Bei modernen CO₂-Lasersystemen wird deshalb das Einstechen im elektrischen Pulsbetrieb durchgeführt, der dann beim eigentlichen Schnitt in den cw-Betrieb umgeschaltet wird.

b) Spitzwinklige Konturen:

Ein gravierendes Qualitätsproblem beim Laserstrahlschneiden spitzwinkliger Konturen ergibt sich zum einen aus der mechanisch bedingten, unvermeidlichen Reduzierung der Geschwindigkeit des Positioniersystems (Umkehrpunkte) und der damit verbundenen höheren eingebrachten Streckenenergie in der Umgebung der „Spitze“ sowie zum anderen aus dem wärmeleitungsbestimmten Hitzestau in der Spitze.

Bei konstant gehaltener Strahlungsleistung resultiert dann die in Abb. 6 a dargestellte Wirkung – eine mehr oder weniger ausgeprägte Verbreiterung des Schneidspaltes, insbesondere ein Wegbrennen bzw. -schmelzen der Spitze. Auch hier gibt es mit dem schleifenförmigen Überfahren der Spitze eine mechanische Lösung, allerdings wieder mit begrenzten Einsatzmöglichkeiten (Abb. 6 b).

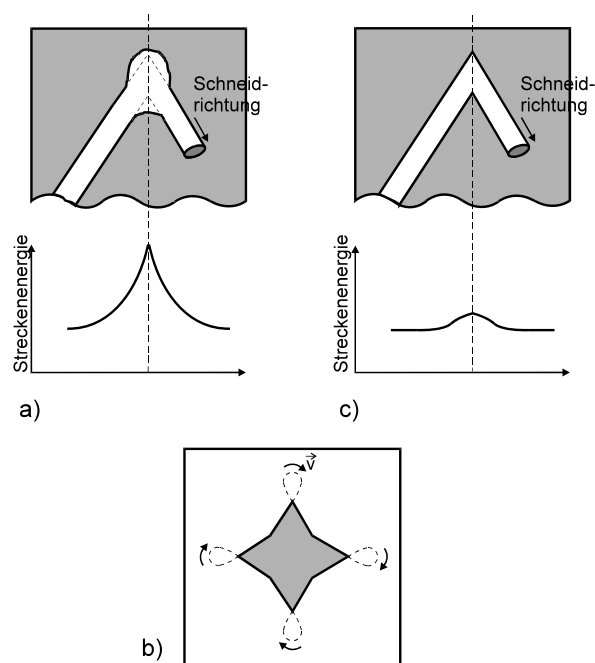


Abb. 6: Zum Schneiden spitzwinkliger Konturen (siehe Text)

Die heute übliche Technik nutzt jedoch auch in diesem Fall die ausgezeichnete Steuerbarkeit der Laserleistung. Mittels abrufbarer Steuerprogramme für unterschiedliche Konturen wird über ein angepasstes Pulsregime in der Umgebung der kritischen Stellen die Streckenenergie so geregelt, dass eine saubere Schnittführung möglich ist (Abb. 6 c).

2.2.4. Polarisation

Ohne die Grundlagen für den Einfluss der Strahlungspolarisation auf die Wechselwirkungsprozesse im Schneidspalt näher darzulegen (s. Fresnelabsorption), soll hier

nur kurz auf praktische Auswirkungen eingegangen werden. Abbildung 7 illustriert die Ausbildung der Schnittfuge für typische geometrische Relationen zwischen einem linear polarisierten Laserstrahl und der Schneidrichtung.

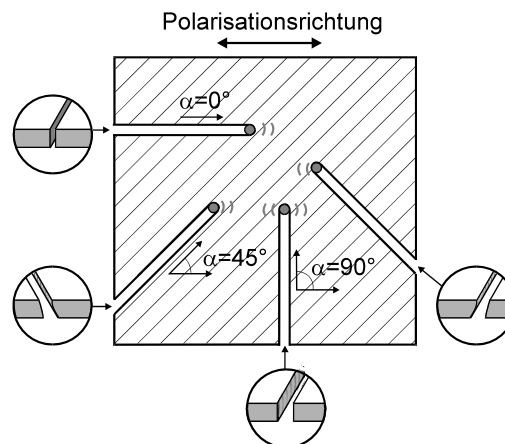


Abb. 7: Zum Einfluss der relativen Lage von Polarisationsrichtung (linear polarisierte Strahlung) und Schneidrichtung auf die Ausbildung der Schnittfuge

Wie aus theoretischen Betrachtungen zu erwarten, ergibt $\alpha = 0^\circ$ (d.h. Polarisations- und Schneidrichtung liegen parallel zueinander) die beste Schnittfuge; sie ist sowohl im Hinblick auf die Schnittfugenbreite als auch die Parallelität der Schnittkanten die optimale Variante.

Bei $\alpha = 90^\circ$, d.h. relativ starker Absorption an den Seitenwänden des Schneidspaltes, sind die Kanten zwar ebenfalls gut parallel, aber die Spaltbreite ist merklich größer.

„Katastrophal“ sind die Verhältnisse in den Zwischenzuständen. Hier wird die Schnittfuge beträchtlich gekrümmt, wobei die Krümmungsrichtung vom Winkel α abhängt.

Aus diesem prinzipiellen Verhalten kann sofort abgeleitet werden, dass ein richtungsunabhängiger Schnitt gleichbleibender Qualität nur erreicht werden kann, wenn

- entweder die Polarisationsrichtung der Schneidrichtung nachgeführt wird (diese Variante erfordert relativ großen technischen Aufwand) oder
- unpolarisierte bzw. zirkular polarisierte Laserstrahlung verwendet wird.

In der Praxis durchgesetzt hat sich das Schneiden mit zirkular polarisierter Laserstrahlung, da sie sich mittels geeigneter optischer Komponenten problemlos aus der üblicherweise gegebenen linear polarisierten Strahlung erzeugen lässt (Verwendung eines $\lambda/4$ -Plättchens).

3. Versuchsdurchführung und Auswertung

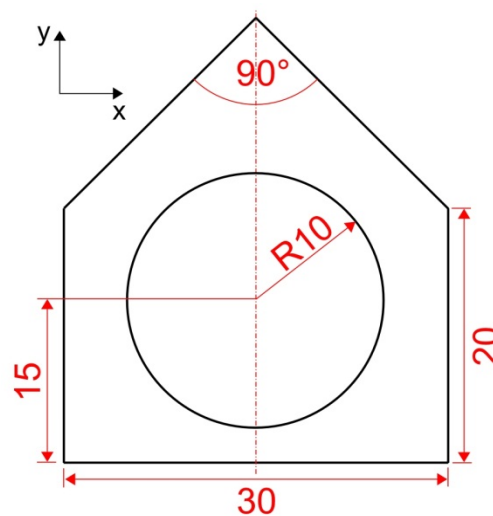
Zur Durchführung des Versuches stehen die folgenden Komponenten zur Verfügung:

- CO₂-Laser FEHA SM1200P (Strahlung linear polarisiert, Impuls- und cw-Betrieb)
- x-y-Bearbeitungstisch mit CNC-Steuerung
- Laserschneidkopf mit ZnSe-Bearbeitungslinse (Brennweite $f = 2,5''$)

- Leistungsmessgerät LAK300 ($P_{\max} = 300 \text{ W cw}$)
- schiefe Ebene zur Bestimmung der Fokusslage
- Auflichtmikroskop mit digitaler Kamera
- Arbeitsgase: O_2 , Pressluft, Inertgase

3.1. Programmierung der vorgegebenen Kontur

Vom Versuchsbetreuer wird eine Übersicht typischer CNC-Befehle, beispielsweise für das Verfahren von geraden oder kreisförmigen Konturen, ausgehändigt. Diese sind Basis für die Umsetzung nachfolgender Kontur. Hierbei soll insbesondere auf die in den Grundlagen angesprochenen Probleme beim „Einstechen“ sowie beim Durchfahren von spitzwinkligen Konturen geachtet werden.



3.2. Laserleistung und Verlustfaktor der LMB-Anlage

Zur Messung der Leistung P_L am Laserausgang wird der kalorimetrische Empfänger (LAK 300) an eine feste Messposition gebracht. Der Injektionsstrom I der Hochspannungsteile des Lasers wird variiert und die entsprechenden Leistungswerte im gepulsten und kontinuierlichen Laserbetrieb aufgenommen. Die Messwerte sind graphisch darzustellen.

Um den Verlustfaktor der LMB-Anlage bestimmen zu können, wird die Laserleistung für einen bestimmten Injektionsstrom unterhalb des Schneidkopfes gemessen. Um dabei die Zerstörung des Detektors zu vermeiden, muss zwischen Schneidkopfdüse und Detektor unbedingt ein Abstand von mindestens 20 cm eingehalten werden.

3.3. Bestimmung der Fokusslage

Die relative Lage des Laserfokus zum Strahlaustritt an der Schneiddüse ist mit der Methode der „schiefen Ebene“ zu bestimmen. Dazu wird eine eloxierte Aluminiumplatte, die unter 12° zur Bearbeitungsebene geneigt ist, unter dem Schneidkopf mit konstantem Vorschub verschoben (s. Abb. 9 a). Der resultierende Farbumschlag entspricht der projizierten

Strahlkaustik der fokussierten Strahlung (Abb. 9 b). Der vertikale Abstand z des Laserfokus zur Oberkante der Aluminiumplatte berechnet sich aus

$$z = a \cdot \sin 12^\circ$$

Zur Bestimmung der Fokuslage wird die schiefe Ebene bei ausgeschaltetem Laser zunächst unter der Schneiddüse positioniert. Der Abstand z_0 zwischen Schneiddüse und Oberkante Platte wird mit einer Fühllehre vermessen. Nach der oben beschriebenen Bestimmung von z ergibt sich der Abstand des Fokus zur Schneiddüse als

$$z_f = z_0 + z$$

Der ermittelte Fokus wird über einen Feintrieb, auf dem das zu bearbeitende Werkstück fixiert ist, zunächst auf die Werkstückoberfläche gelegt.

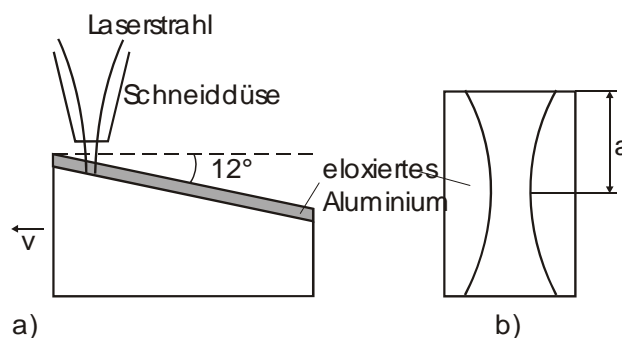


Abb. 9: Bewegung der schiefen Ebene relativ zum Schneidkopf (a) und projizierte Strahlkaustik auf der eloxierten Aluminiumplatte mit Abstand a des Fokus zur Oberkante (b)

3.4. Optimierung des Bearbeitungsergebnisses

In diesem Versuchsteil sind Probeschnitte in Vorzugsrichtung (Richtung der linearen Polarisation parallel zum Vorschub) durchzuführen. Durch die geeignete Variation der Einflussparameter Vorschub, Laserleistung, Fokuslage und Schneidgasdruck ist eine Optimierung des Bearbeitungsergebnisses vorzunehmen. Zur Auswertung der Schnittqualität, insbesondere der Breite von Schnittspalt und Wärmeeinflusszone sowie der Rauigkeit der Schnittspalte, steht ein Messmikroskop mit digitaler Kamera zur Verfügung. Die erzielten Ergebnisse sind ausführlich zu dokumentieren und diskutieren.

3.5. Ausschneiden einer vorgegebenen Kontur

Mit den in Aufgabe 3.4 ermittelten, optimalen Bearbeitungsparametern ist die eingangs programmierte Kontur aus Baustahl ($d = 1 \text{ mm}$) auszuschneiden. Das Bearbeitungsergebnis ist ausführlich zu diskutieren. Dabei soll insbesondere auf die problematischen Stellen auf der Kontur sowie auf den Einfluss der Polarisation eingegangen werden. Mittels des

Messmikroskops sind die zugänglichen Schnittkanten aufzunehmen. Aus den Fotos sind anschließend der Abstand sowie die Krümmung der Riefen zu bestimmen.

4. Weiterführende Literatur

- [1] G. Herziger und P. Loosen: „Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung“ (Hanser, München, 1993).
- [2] H. Hügel und T. Graf: „Laser in der Fertigung“ (Teubner, Stuttgart, 2009).
- [3] F. K. Kneubühl und M. W. Sigrist: „Laser“ (Teubner, Stuttgart, 2008).
- [4] W. M. Steen: „Laser Material Processing“ (Springer, Berlin, 1991).